

УДК 681.586.5

**О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, Рус.Ш. Мисбахов,
А.А. Кузнецов, Т.А. Аглиуллин, В.И. Артемьев, А.А. Иванов,
В.К. Закамский, Н.А. Казаков**

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ – НОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ РАДИОФОТОННЫХ МНОГОСЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

В работе получены аналитические выражения, позволяющие определить сдвиг центральной длины волны четырехкомпонентной адресной волоконной брэгговской структуры (ЧАВБС). Проведено компьютерное моделирование применения ЧАВБС в задачах измерения температуры обмоток силовых трансформаторов. Моделирование показало, что более точные результаты измерения температуры получаются при работе схемы на отражение, т.е. на дополнительной адресной частоте. С использованием ЧАВБС пропадает необходимость установки дополнительных частотных фильтров. Не требуется использовать схемы восстановления адресных компонент по сравнению с вариантом трехкомпонентных АВБС. Данный факт является существенным отличием разработанных систем на ЧАВБС от систем на основе двух- и трехкомпонентных АВБС.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, адресные волоконные брэгговские структуры, радиофотоника.

**O.G. Morozov, A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, Rus.Sh. Misbakhov,
A.A. Kuznetsov, T.A. Agliullin, V.I. Artemiev, A.A. Ivanov, V.K. Zakamsky,
N.A. Kazakov**

Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

FOUR-COMPONENT ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES – A NEW ELEMENT OF RADIO-PHOTONIC MULTISENSOR NETWORKS

In this work, analytical expressions are obtained that allow one to determine the shift of the central wavelength of a four-component addressable fiber Bragg structure (FAFBS). The computer simulation of the use of CHAVBS in the problems of measuring the temperature of the windings of power transformers has been carried out. Simulation showed that more accurate temperature measurement results are obtained when the circuit operates in reflection, i.e. at an additional address frequency. With the use of FAFBS, there is no need to install additional frequency filters. It is not required to use address component recovery schemes compared to the three-component AFBS option. This fact is a significant difference between the developed systems based on AFBS and systems based on two- and three-component AFBS.

Keywords: fiber optic sensor, fiber Bragg grating, addressed fiber Bragg structures, microwave photonics.

Введение

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) получили широкое распространение с момента их появления в конце 1970-х гг. [1], особенно в качестве чувствительных элементов для измерения различных физических полей. Их привлекательные свойства, такие как компактность и малый вес, устойчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность, возможность прямых измерений объединения нескольких ВБР в единую систему, обусловили их применение во многих областях, включая аэрокосмическую [2], автомобилестроения [3], биомедицинскую [4], гражданского строительства, нефтегазовой промышленности [5] и др.

На сегодняшний день разработано несколько методов мультиплексирования и опроса ВБР. Наиболее распространено мультиплексирование по длинам волн [6], по частоте [7], по времени [8] и по пространству [9] с соответствующими традиционными технологиями опроса, которые реализуются, к сожалению, с помощью сложных и дорогостоящих оптоэлектронных устройств, таких как анализаторы спектра, перестраиваемые интерферометры Фабри–Перо, дифракционные решетки и т.д. Еще одной проблемой традиционных методов опроса является отсутствие адресности датчиков, что приводит к ошибкам опроса при перекрытии спектров разных решеток. Чтобы смягчить эту проблему, были предложены методы опроса ВБР с оптическим кодированием спектра [10,11], в которых датчики опрашиваются в реальном времени в соответствии с автокорреляцией между спектрами датчиков и их кодовой сигнатурой, что позволяет различать несколько ВБР в одном и том же спектральном диапазоне.

Нами был предложен другой подход, в котором ВБР выполняет тройную функцию: кроме сенсора (аналогично классической ВБР) она выступает также в качестве формирователя двухчастотного излучения, по спектральным параметрам компонент которого, прошедшего через фильтр с заданной наклонной линейной характеристикой, можно судить о положении ее центральной длины волны в ходе измерения (технология опроса), а по уникальной разностной частоте между компонентами – об адресе (адресное мультиплексирование). Такие ВБР мы назвали адресными волоконными брэгговскими структурами (АВБС) [12, 13].

АВБС – это тип ВБР, спектральный отклик которого состоит из двух узких отражающих компонент – АВБС λ -типа или окон прозрачности – АВБС π -типа. Таким образом, АВБС можно разделить на два класса. При определенном подключении АВБС обоих классов к широкополосному оптическому источнику формируется ее выходное излучение, состоящее из двух узкополосных частот, разность между которыми называется адресной частотой и относится к микроволновому диапазону (ГГц). Адресная частота не зависит от смещения центральной длины волны АВБС, когда она подвергается внешним воздействиям. Поэтому адресная частота используется как отличительный параметр, позволяющий опрашивать несколько АВБС даже при совпадении их центральных длин волн. Таким образом, адресная частота – это атрибут АВБС.

Впоследствии понятие АВБС было расширено за счет включения в него структур с тремя и более спектральными компонентами, образующими две и более адресные частоты, которые также известны как многоадресные волоконные брэгговские структуры (МАВБС) [14]. Увеличенное количество адресных частот позволяет повысить точность определения центральной длины волны, а также расширить сенсорные возможности системы.

Было предложено два подхода к формированию МАВБС: введение двух и более фазовых π -сдвигов в периодическую структуру ВБР ($N\pi$ -МАВБС, где N – число фазовых сдвигов) [15, 16] и последовательная запись нескольких сверхузкополосных ВБР с разными центральными длинами волн ($N\lambda$ -МАВБС) [17, 18]. Для первого типа для опроса используется прошедшее излучение, а для второго типа используется отраженный свет. Таким образом, отражающие и пропускающие МАВБС составляют классификацию нового, более развитого уровня $N\pi$ -типа и $N\lambda$ -типа.

Вторая классификация МАВБС синтезируется по атрибуту нового уровня – количеству адресов: одноадресная, представляющая собой двухкомпонентную АВБС (ОАВБС); двухадресная, представляющая собой симметричную трехкомпонентную МАВБС (ДАВБС) с боковыми адресными компонентами, разнесенными на одну адресную частоту от центральной адресной компоненты; трехадресная, представляет собой асимметричную трехкомпонентную МАВБС (ТАВБС) с боковыми адресными компонентами, разнесенными на разные адресные частоты от центральной адресной компоненты.

Третья классификация МАВБС синтезируется по другому новому атрибуту – классификация по совпадению длины волны центральной адресной компоненты и центральной (брэгговской) длины волны всей структуры в целом. Возможность определения брэгговской длины волны для всей структуры в целом следует из неизменности положения компонент адреса при воздействии на структуру физических полей. Длину волны Брэгга можно определить как находящуюся посередине между длинами волн боковых компонент, совпадающую с длиной волны центральной адресной компоненты либо не совпадающую. В качестве альтернативы длину волны Брэгга можно определить через положение любой из адресных компонент, поскольку структура МАВБС, как уже излагалось, известна.

Использование АВБС и МАВБС любого типа значительно упрощает схему опроса по сравнению с традиционными оптико-электронными методами, так как требует только широкополосного источника света, оптического фильтра с заданной наклонной линейной частотной характеристикой и фотоприемника. Поскольку обработка сенсорной информации ведется на компонентах адресной частоты, лежащей в СВЧ-диапазоне, мы назвали схему опроса радиофотонным адресным интеррогатором (РАИ).

РАИ работает следующим образом. Лазерный источник генерирует широкополосное оптическое излучение, полоса пропускания которого перекрывает весь диапазон сдвигов длин волн компонент МАВБС. Излучение проходит через N адресных структур, соединенных либо параллельно с помощью волоконно-оптических разветвителей и сумматоров (в случае МАВБС $N\pi$ -типа), либо последовательно (в случае МАВБС $N\lambda$ -типа). На выходе каждой МАВБС формируется излучение с двумя спектральными составляющими, разнос между которыми соответствует адресной частоте. Измеряя амплитуду выходного сигнала фотоприемника на адресной частоте, которая будет изменяться из-за внешнего воздействия, можно определить величину последнего как сдвиг центральной длины волны МАВБС (или любой из ее компонент) относительно наклонной линейной частотной характеристики оптического фильтра.

МАВБС $N\lambda$ -типа позволяют строить простейший РАИ, но ширина полосы их частотных компонент не может быть ниже 1 ГГц. МАВБС $N\pi$ -типа используют окна прозрачности с шириной полосы 50

МГц, но структура РАИ для них оставляет желать лучшего. Соответственно в первом случае разрешающая способность будет хуже в 20 раз. Один из выходов из сложившейся ситуации – построение комбинированных МАВБС $N(\lambda/\pi)$ -типа, чему и посвящена настоящая статья.

1. Математическая модель комбинированной адресной волоконной брэгговской структуры

Рассмотрим вариант адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа, которая содержит две идентичные разнесенные по длине волны сверхзаклопосные ВБР, в каждой из которых сформирован фазовый π -сдвиг ($2\lambda/\pi$ -АВБС) (рис. 1).

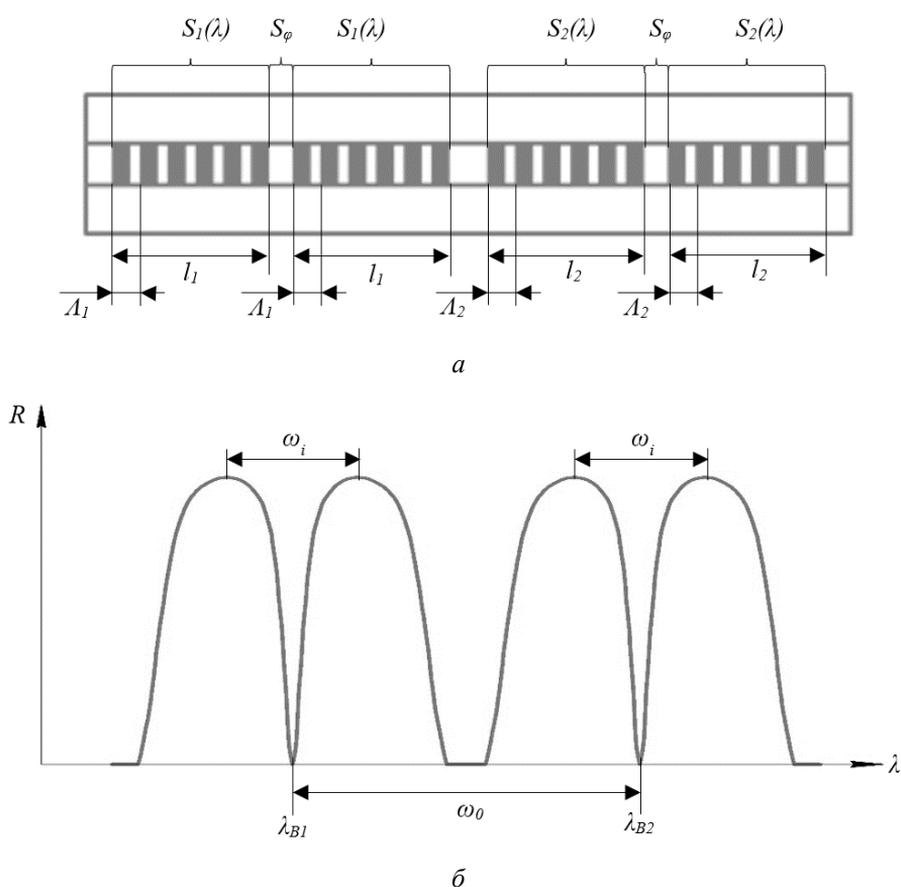


Рис. 1. Адресная волоконная брэгговская структура комбинированного типа: *a* – структура; *б* – условная спектральная характеристика отражения

Преимуществом использования в качестве чувствительного элемента ВОД $2\lambda/\pi$ -АВБС по сравнению с другими оптическими методами является формирование адреса как в гига-, так и мегагерцовом диапазоне, что позволяет снизить стоимость радиофотонного интеррогатора по фотоприемнику, а также дает возможность различать малые уходы двух близкорасположенных адресных волоконных брэгговских структур в многосенсорной системе при возможном перекрытии их спектров, а также возможность работы как на отражение, так и на пропускание.

При построении математической модели адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа применялся метод матриц передач. Выбор метода обусловлен возможностью моделирования различных неоднородных волоконных брэгговских структур, в том числе волоконных брэгговских решеток с одним и более фазовыми сдвигами. Для построения $2\lambda/\pi$ -ВБР, согласно методу матриц передач, необходимо разбить волоконную брэгговскую структуру на четыре секции, где между первой, второй и третьей, четвертой секциями будет внесен фазовый сдвиг, при этом периоды первой и второй секции не должны быть равны периодам третьей и четвертой секции.

Матрица передачи каждой секции $S_m(\lambda)$ описывается следующим образом:

$$S_m(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l} - r(\lambda)^2 \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{-r(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} + r(\lambda) \cdot e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} - r(\lambda) \cdot e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} - r(\lambda)^2 \cdot e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где l – длина секции, $r(\lambda) = [q(\lambda) - \sigma\beta(\lambda)] / k$, $q(\lambda) = \sqrt{\sigma\beta(\lambda)^2 - k^2}$, $\beta(\lambda) = 2\pi(1/\lambda - 1/\lambda_B)$ – параметр расстройки контура, λ_B – центральная длина волны ВБР, $k = \pi \cdot \sigma n / \lambda_B$ – постоянная распространения, $\sigma n = n_{\text{mod}} / n_{\text{eff}}$ – индекс модуляции коэффициента преломления, n_{mod} – величина наведенного показателя преломления ВБР, n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волокна.

Фазовый сдвиг в спектре ВБР формируется с помощью специальной матрицы S_ϕ :

$$S_{\varphi} = \begin{bmatrix} e^{-\varphi} & 0 \\ 0 & e^{\varphi} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где φ – величина фазового сдвига.

Результирующая матрица волоконной брэгговской решетки с одним фазовым сдвигом $S_{res}(\lambda)$ запишется в виде произведения матриц передачи первой и второй секции и одной матрицы фазового сдвига:

$$S_{res}(\lambda) = S_1(\lambda) \cdot S_{\varphi} \cdot S_2(\lambda). \quad (3)$$

Выражение для спектра пропускания ВБР одним фазовым сдвигом будет иметь вид:

$$T_{res}(\lambda) = \left(\left| S_{res}(\lambda)_{11} - \frac{S_{res}(\lambda)_{12} \cdot S_{res}(\lambda)_{21}}{S_{res}(\lambda)_{22}} \right| \right)^2. \quad (4)$$

Выражение для спектра отражения ВБР одним фазовым сдвигом будет иметь следующий вид:

$$R_{res}(\lambda) = \left(\left| \frac{S_{res}(\lambda)_{21}}{S_{res}(\lambda)_{22}} \right| \right)^2. \quad (5)$$

Спектральную характеристику отражения $2\lambda/\pi$ -ВБР можно определить как:

$$R_{2\lambda/\pi\text{FBG}}(\lambda) = R_{res1}(\lambda) + R_{res2}(\lambda). \quad (6)$$

2. Моделирование спектральной характеристики адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа

Математическое моделирование профиля спектра отражения $2\lambda/\pi$ -АВБС было проведено в программной среде Mathcad, при исходных данных представленных в таблице.

Полученный спектр отражения иллюстрирует возможность применения систем на основе АВБС комбинированного типа при различных режимах работы схемы, а именно при работе на пропускание и на отражение, поскольку в обоих случаях присутствуют адресные частоты $\Delta\omega_0$, обозначенные на рис. 2, а также частота $\Delta\omega_i$, которую можно назвать адресной частотой второго уровня.

Основные исходные данные для построения модели

Параметр	Значение
Период первой ВБР, Λ_1 (мкм)	0,533782
Период второй ВБР, Λ_2 (мкм)	0,533847
Центральная длина волны первой ВБР, λ_{B1} (нм)	1549,9
Центральная длина волны второй ВБР, λ_{B2} (нм)	1550,089
Эффективный показатель преломления, n_{eff}	1,452
Наведенный показатель преломления ВБР, n_{mod}	$9 \cdot 10^{-5}$
Длины секций $2\lambda/\pi$ -ВБР $l_1: l_2: l_3: l_4$ (мм)	15:15:15:15
Величина фазового сдвига, рад.	π

Полученный спектр отражения АВБС комбинированного типа представлен на рис. 2.

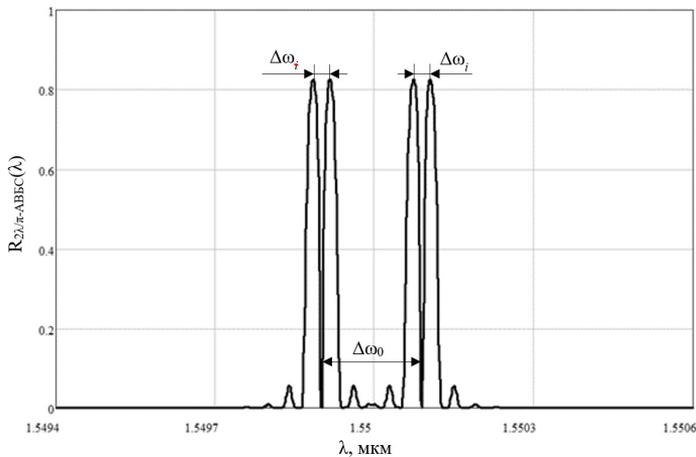


Рис. 2. Спектр отражения адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа

При анализе полученного спектра отражения АВБС комбинированного типа были определены основные разностные частоты: адресная частота $\Delta\omega_0 = 23$ ГГц и может быть использована как при работе на пропускание, так и на отражение, адресная частота второго уровня $\Delta\omega_i = 7$ ГГц и может быть использована как уточняющая при работе на отражение.

Проведем анализ спектральной характеристики $2\lambda/\pi$ -АВБС при изменении ее основных параметров. На рис. 3 представлены спектры $2\lambda/\pi$ -АВБС при равномерном изменении периодов секций структуры.

Результаты математического моделирования показывают, что при равномерном изменении периодов секций происходит пропорциональный сдвиг центральных длин волн $2\lambda/\pi$ -АВБС, при этом изменение периода не оказывает влияния на спектральную характеристику структуры.

На рис. 4 представлены спектры $2\lambda/\pi$ -ВБР при различных значениях величины наведенного показателя преломления.

Результаты математического моделирования показывают, что при уменьшении величины наведенного показателя преломления n_{mod} происходит уменьшение коэффициента отражения $2\lambda/\pi$ -АВБС, при этом адресные частоты $\Delta\omega_0$ и $\Delta\omega_i$ остаются постоянными.

На рис. 5 представлены спектры $2\lambda/\pi$ -ВБР при изменении длины секций l_1, l_2, l_3, l_4 . При моделировании общая длина структуры оставалась постоянной (60 мм).

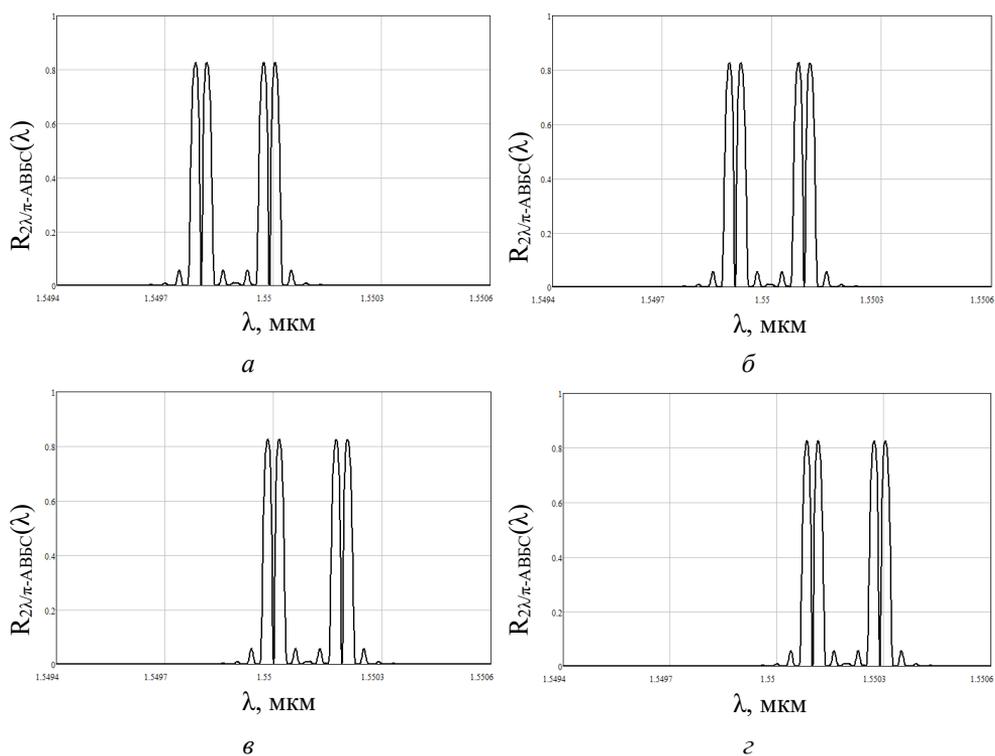


Рис. 3. Спектры $2\lambda/\pi$ -АВБС при равномерном изменении периода: *a* – $\Lambda_1 = 0,53375$ мкм; $\Lambda_2 = 0,53381$ мкм; *б* – $\Lambda_1 = 0,53378$ мкм; $\Lambda_2 = 0,53384$ мкм; *в* – $\Lambda_1 = 0,53381$ мкм; $\Lambda_2 = 0,53388$ мкм; *г* – $\Lambda_1 = 0,53385$ мкм; $\Lambda_2 = 0,53392$ мкм

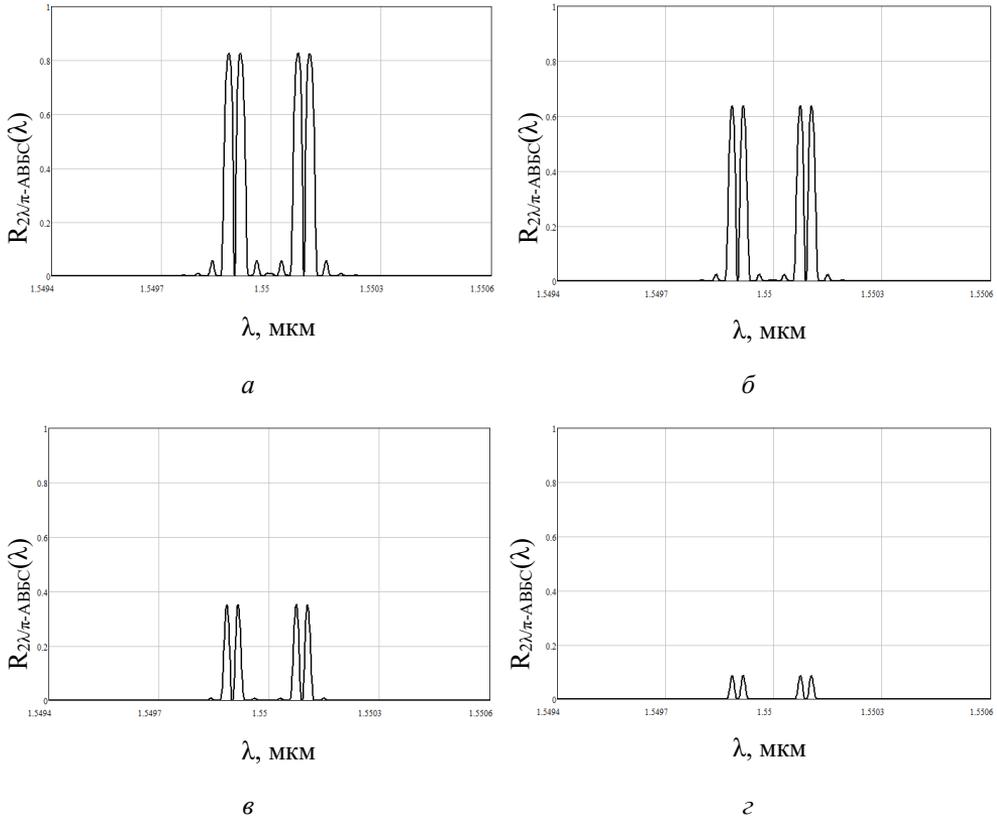


Рис. 4. Трансформации спектра $2\lambda/\pi$ -АВБС при изменении величины наведенного показателя преломления ВБР: $a - n_{\text{mod}} = 9 \cdot 10^{-5}$; $б - n_{\text{mod}} = 7 \cdot 10^{-5}$; $в - n_{\text{mod}} = 5 \cdot 10^{-5}$; $г - n_{\text{mod}} = 3 \cdot 10^{-5}$

Результаты математического моделирования показывают, что нарушение симметричности приводит к значительным изменениям формы спектра, в том числе коэффициента отражения и глубины провала в профиле спектра отражения, при этом окно прозрачности в профиле спектра отражения начинает пропадать при разности секций ВБР, равной 3 мм, и полностью пропадает при разности, равной 22 мм. Кроме того, до начала изменения формы спектра основная адресная частота $\Delta\omega_0$ и адресная частота второго уровня $\Delta\omega_1$ остаются постоянными. Данный факт может быть использован при построении систем с уставкой определенных измеряемых параметров, для которых характерно наличие неравномерных продольных деформаций.

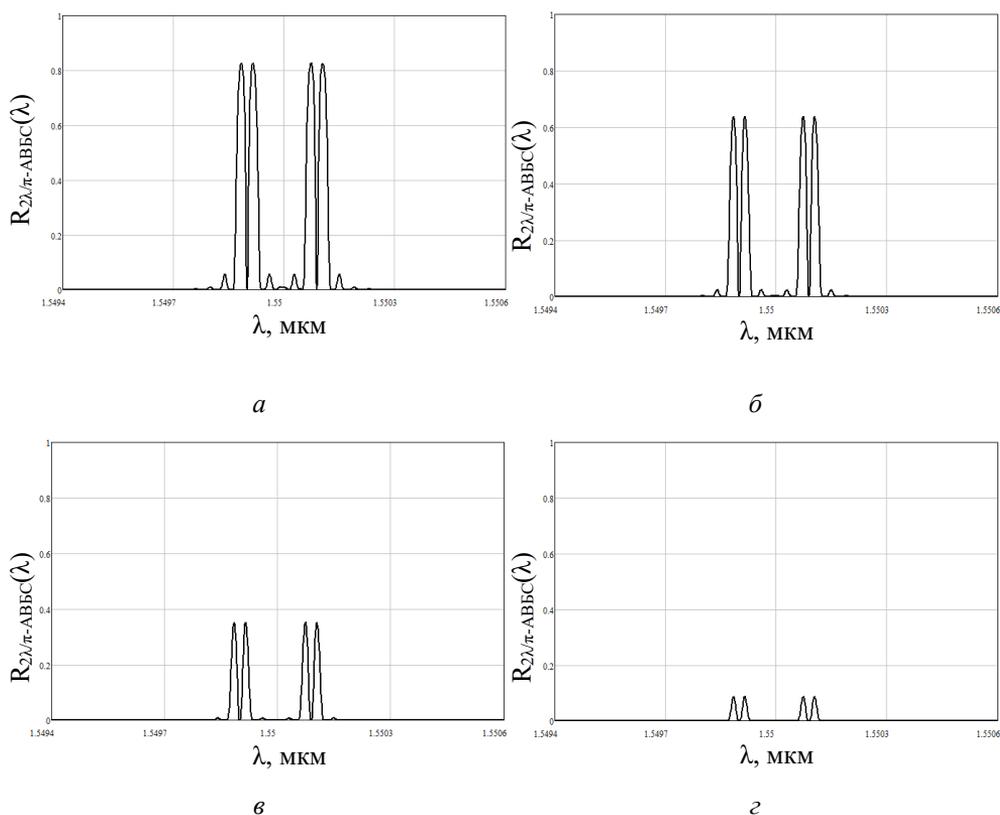


Рис. 5. Трансформации спектра $2\lambda/\pi$ -АВБС при изменении длины секций $l_1: l_2: l_3: l_4$ (мм): а – 15: 15: 15: 15; б – 12,5: 17,5: 10: 20; в – 7,5: 22,5: 5: 25; г – 3,5: 26,5: 1: 29

3. Опрос адресной волоконной брэгговской решетки комбинированного типа

Рассмотрим структурные схемы квазираспределенной сенсорной системы на основе адресных волоконных брэгговских структур комбинированного типа при различных режимах работы схемы. На рис. 6, а показана структурная схема многосенсорной системы мониторинга параметров продольных деформаций на основе АВБС комбинированного типа при режиме работы схемы на отражение.

Широкополосное излучение от источника лазерного излучения I направляется в волоконно-оптические датчики $3_1 - 3_N$ через циркулятор 2. В каждом волоконно-оптическом датчике $3_1 - 3_N$ из полного спектра света вырезаются четыре узкополосных участка с разносом $\Delta\lambda_1$

и $\Delta\lambda_2$, где $\Delta\lambda_1$ – разность длин волн в первой ВБР, $\Delta\lambda_2$ – разность длин волн во второй ВБР, которые между собой равны: $\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2$, при этом разнос фазовых сдвигов $\Delta\lambda_i \neq \Delta\lambda_j$, где i и j – номера оптических датчиков $3_1 - 3_N$, $i, j \in N$, где N – множество оптических датчиков $3_1 - 3_N$, при этом разность $\Delta\lambda_i - \Delta\lambda_j$ не равна и не кратна в целом и частном $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_j$.

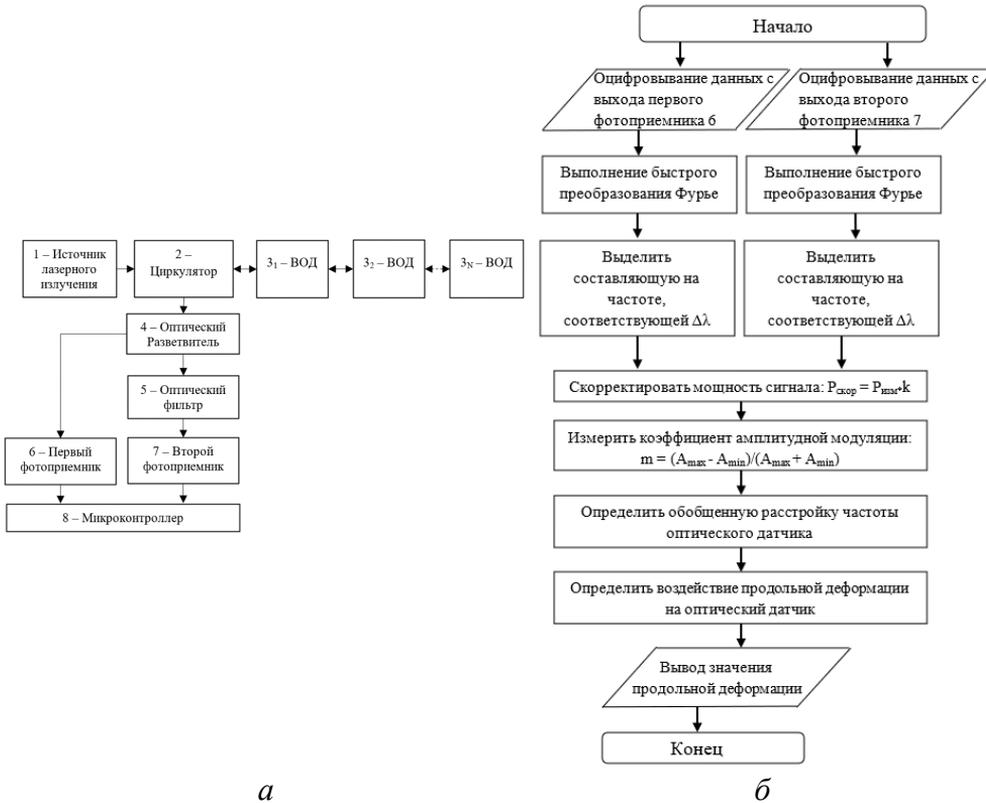


Рис. 6. Структурная схема квазираспределенной сенсорной системы на основе адресных волоконных брэгговских структур комбинированного типа при режиме работы схемы на отражение (а), алгоритм работы микроконтроллера (б)

Далее отраженное излучение от волоконно-оптических датчиков $3_1 - 3_N$ через циркулятор 2 направляется в оптический разветвитель, где разделяется на две части, одна из которых направляется на первый фотоприемник 6, другая попадает во второй фотоприемник 7 через оптический фильтр 5, где происходит ослабление сигнала, в со-

ответствии с его спектральным положением относительно характеристики пропускания оптического фильтра 5. Таким образом, на выходе первого фотоприемника 6 формируется огибающая биений двух частотных составляющих равной амплитуды с частотой, соответствующей разному $\Delta\lambda$, а на выходе второго фотоприемника 7 формируется огибающая биений двух частотных составляющих разной амплитуды, зависящих от спектрального положения пропущенного от оптических датчиков $3_1 - 3_N$ света, также с частотой, соответствующей разному $\Delta\lambda$.

Микроконтроллер 8 принимает сигналы с первого и второго фотоприемников 6 и 7 и обрабатывает их по алгоритму, представленному на рис. 6, б.

В режиме работы на пропускание схема функционирует аналогично вышеописанному режиму, за исключением того, что на фотоприемники поступает излучение не отраженное, а прошедшее через датчики.

Проведем математическое моделирование волоконно-оптического датчика продольной деформации на основе АВБС комбинированного типа. Для определения смещения центральной длины волны датчика необходимо установить наклонный фильтр, математическую модель которого можно записать в виде:

$$L(\lambda) = u \cdot \lambda + v, \quad (7)$$

где u – угол наклона; v – смещение по оси ординат.

Диапазон измерения температуры как основного фактора, вызывающего равномерную деформацию структуры в силовых трансформаторах, составляет от -25 до $+300$ °С. Параметры u и v были выбраны таким образом, чтобы наклонный фильтр покрывал весь диапазон измерения температуры (от 1549 до 1553,5 нм).

Предположим, что воздействие температуры на АВБС равномерно. Учитывая, что сдвиг центральной длины волны для стандартной ВБР при воздействии температуры составляет 10 пм/°С, то в ходе математического моделирования центральная длина волны $2\lambda/\pi$ -АВБС смещалась на 3 нм, что соответствует максимальной температуре $+300$ °С.

На рис. 7 представлены спектры отражения $2\lambda/\pi$ -АВБС при различных значениях воздействия температуры на датчик.

На рис. 8 представлены спектры пропускания $2\lambda/\pi$ -АВБС при различных значениях воздействия температуры на датчик. Применяв быстрое преобразование Фурье и выделив основную и второго порядка адресные частоты, получим спектры сигналов биений при различном значении температуры (рис. 9 и 10).

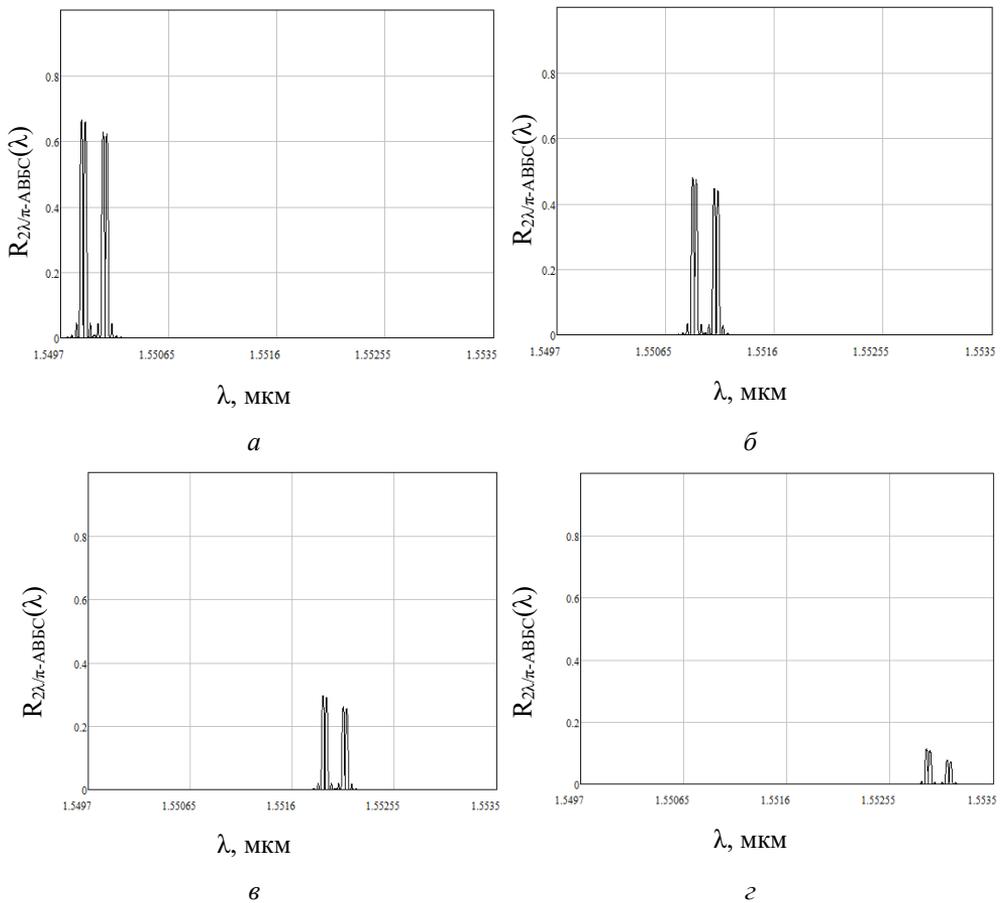


Рис. 7. Спектры отражения $2\lambda/\pi$ -АВБС при различных значениях воздействия температуры на датчик: *a* – $T = 0^\circ\text{C}$; *б* – $T = 100^\circ\text{C}$; *в* – $T = 200^\circ\text{C}$; *г* – $T = 300^\circ\text{C}$

Результаты математического моделирования показали, что при увеличении температуры происходит равномерный сдвиг центральной длины волны $2\lambda/\pi$ -АВБС, что в соответствии с характеристикой

наклонного фильтра приводит к линейному уменьшению амплитуды сигнала биений как в случае работы схемы на отражение, так и на пропускание.

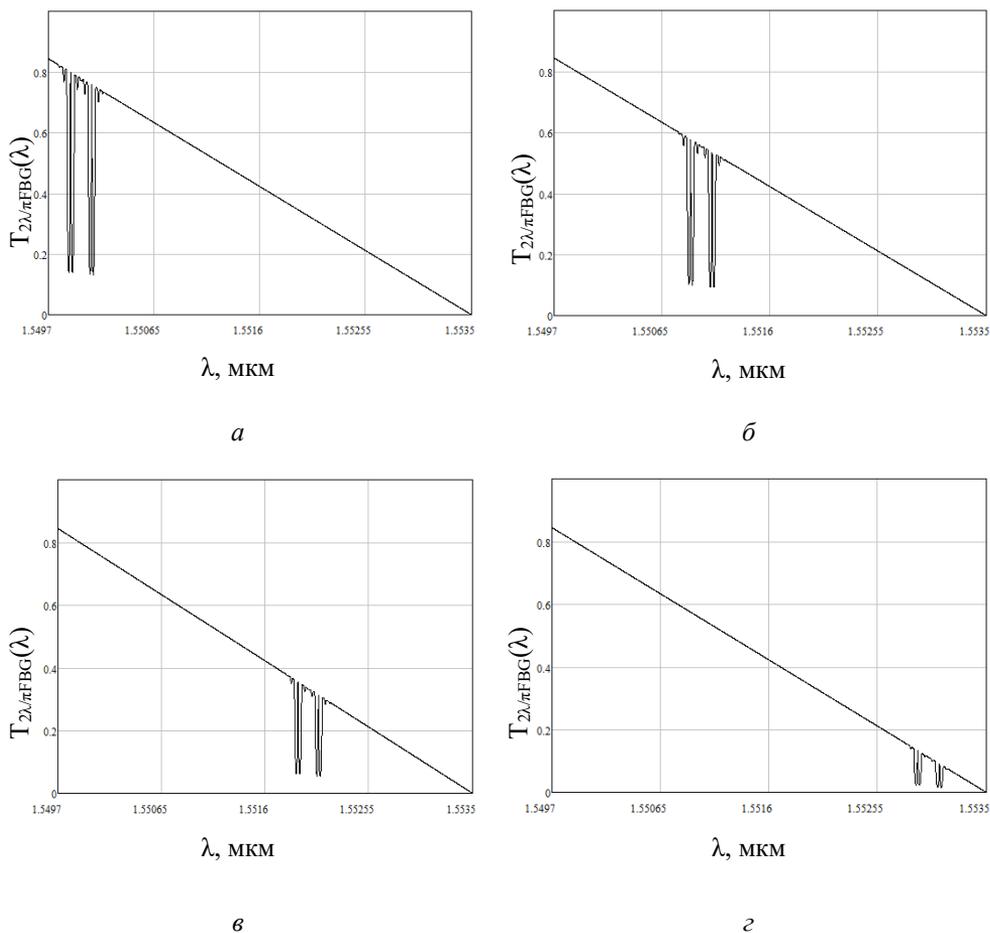


Рис. 8. Спектры пропускания $2\lambda/\pi$ -ВБР при различных значениях воздействия температуры на датчик: *a* – $T = 0^\circ\text{C}$; *б* – $T = 100^\circ\text{C}$; *в* – $T = 200^\circ\text{C}$, *г* – $T = 300^\circ\text{C}$

Данное обстоятельство показывает возможность использования разработанной структуры при контроле параметров температуры обмоток силовых трансформаторов.

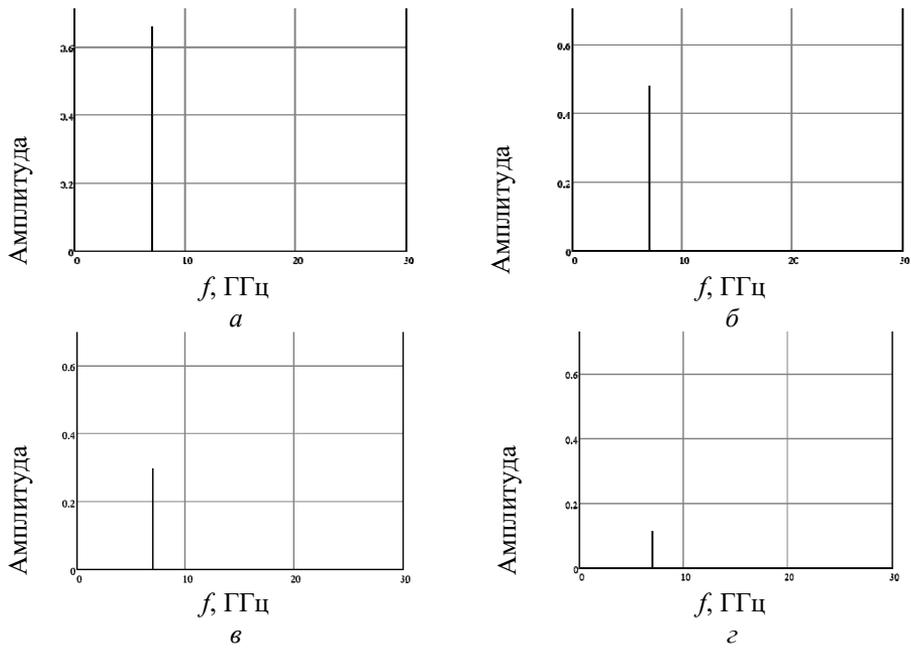


Рис. 9. Спектр сигнала биений при работе схемы на отражение: *а* – $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* – $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; *г* – $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

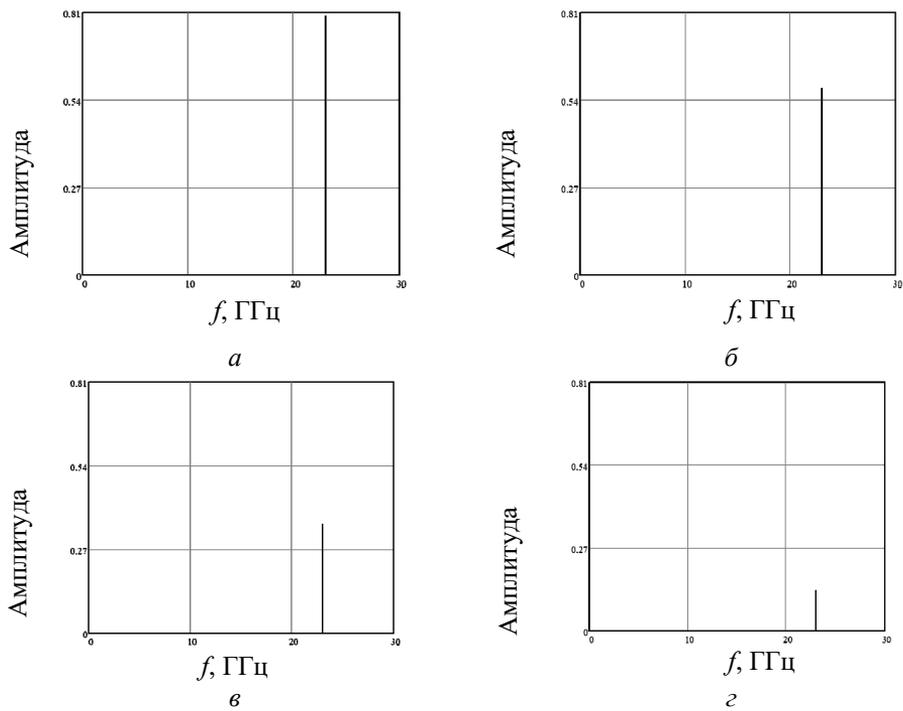


Рис. 10. Спектр сигнала биений при работе схемы на пропускание: *а* – $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* – $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; *г* – $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Кроме того, данную схему возможно использовать не только при измерениях температуры, но и при контроле изменения геометрии шин обмоток силовых трансформаторов, поскольку принцип работы схемы будет аналогичным принципу измерения температуры.

На рис. 11 представлены зависимости амплитуды сигнала биений от воздействия температуры при различных режимах работы схемы.

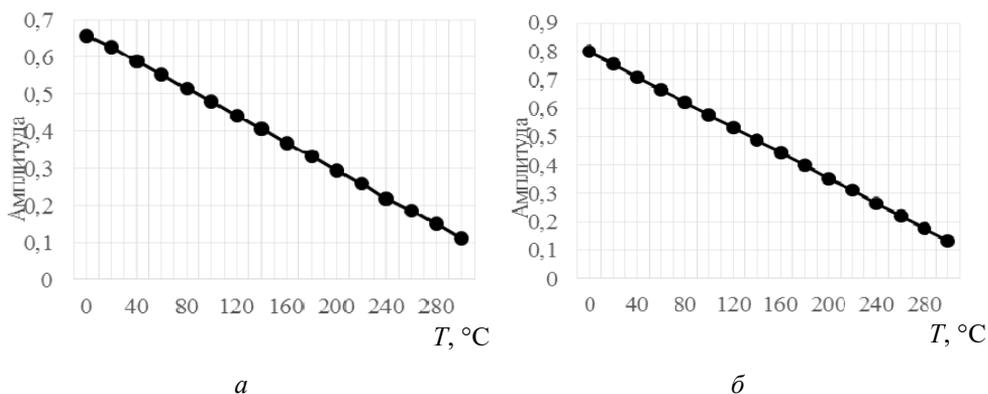


Рис. 11. Зависимость амплитуды сигнала биений от воздействия температуры при работе схемы: на отражение (а), на пропускание (б)

Заключение

Разработана математическая модель адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа с использованием метода матриц передач. Проведен анализ спектра адресной волоконной брэгговской структуры комбинированного типа при изменении ее параметров: периода, величины наведенного показателя преломления, длин однородных участков, фазового сдвига. Разработаны структурные схемы многосенсорной системы мониторинга параметров силовых трансформаторов при различных режимах работы. Разработан алгоритм работы контроллера определения параметров силовых трансформаторов. Проведено математическое моделирование принципа работы волоконно-оптического датчика на основе адресной волоконной брэгговской структуры при работе схемы на отражение и на пропускание. Результаты моделирования показали, что смещение центральной длины волны $2\lambda/\pi$ -ВБР приводит к линейному уменьшению амплитуды сигнала биений как в случае работы схемы на отражение, так и на пропускание.

Список литературы

1. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication / K.O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – Vol. 32. – P. 647–649.
2. Hegde G., Asokan S., Hegde G. Fiber Bragg grating sensors for aerospace applications: a review // *ISSS Journal of Micro and Smart Systems.* – 2022. – Vol. 11. – P. 257–275.
3. Strain modal testing with fiber Bragg gratings for automotive applications / F. Falcatelli, A. Martini, R. Di Sante, M. Troncossi // *Sensors.* – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 946.
4. Optical fibre pressure sensors in medical applications / S. Poeggel, D. Tosi, D. Duraibabu, G. Leen, D. McGrath, E. Lewis // *Sensors.* – 2015. – Vol. 15, № 7. – P. 17115–17148.
5. Baldwin C. 8-Fiber optic sensors in the oil and gas industry: current and future applications // *Opto-mechanical fiber optic sensors* / ed. H. Alemohammad. – Butterworth-Heinemann. – 2018. – P. 211–236.
6. Measures R.M., Melle S., Liu K. Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues // *Smart Mater. Struct.* – 1992. – Vol. 1, № 1. – P. 36–44.
7. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material / V.P. Matveenko, I.N. Shardakov, A.A. Voronkov, N.A. Kosheleva, D.S. Lobanov, G.S. Serovaev, E.M. Spasokova, G.S. Shipunov // *Structural Control and Health Monitoring.* – 2018. – Vol. 25, № 3. – P. e2118.
8. Davis M.A., Bellemore D.G., Kersey A.D. Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array // *Second European Conference on Smart Structures and Materials. Proc. SPIE.* – 1994. – Vol. 2361. – P. 342–345.
9. Spatially-multiplexed fibre-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection / Y.J. Rao, K. Kalli, G. Brady, D.J. Webb, D.A. Jackson, L. Zhang, I. Benjion // *Electronics Letters.* – 1995. – Vol. 31, № 12. – P. 1009–1010.
10. Triana C.A., Pastor D., Varón M. A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks // *Sensors.* – 2017. – Vol. 17, № 11. – P. 2508.
11. Triana C.A., Pastor D., Varón M. Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors // *Opt. Pura Apl.* – 2016. – Vol. 49, № 1. – P. 17–28.

12. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.J. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems // *Computer Optics*. – 2019. – Vol. 43, № 4, – P. 535–543.

13. Addressed fiber Bragg structures in load-sensing wheel hub bearings / T. Agliullin, R. Gubaidullin, A. Sakhabutdinov, O. Morozov, A. Kuznetsov, V. Ivanov // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, № 21. – P. 6191.

14. Multi-addressed fiber Bragg structures for microwave-photonic sensor systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov, R. Misbakhov, A. Kuznetsov, T. Agliullin // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, № 9. – P. 2693.

15. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts / O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, R.S. Misbakhov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1368, № 2. – P. 022048.

16. Mathematical modeling of the optical response from addressed fiber Bragg structure based on lorentz function / T.A. Agliullin, R.R. Gubaidullin, O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov // XVII International Scientific and Technical Conference "Optical Technologies for Telecommunications". Proc. of SPIE. – 2020. – Vol. 11516. – P. 1151614.

17. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on two identical ultra-narrow gratings with different central wavelengths / O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, R.S. Misbakhov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – Vol. 1368, № 2. – P. 022049.

18. Application of Gaussian function for modeling two-frequency radiation from addressed FBG / R.R. Gubaidullin, T.A. Agliullin, I.I. Nureev, A.Zh. Sahabutdinov, V. Ivanov // *Proceedings of Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. – 2020. – P. 1–4.

References

1. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, vol. 32, pp. 647-649.

2. Hegde G., Asokan S., Hegde G. Fiber Bragg grating sensors for aerospace applications: a review. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, 2022, vol. 11, pp. 257-275.

3. Falcetelli F., Martini A., Di Sante R., Troncosi M. Strain modal testing with fiber Bragg gratings for automotive applications. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 3, p. 946.

4. Poeggel S., Tosi D., Duraibabu D., Leen G., McGrath D., Lewis E. Optical fibre pressure sensors in medical applications. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 17115-17148.
5. Baldwin C. Fiber optic sensors in the oil and gas industry: current and future applications. *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors*. Ed. H. Alemohammad. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 211-236.
6. Measures R.M., Melle S., Liu K. Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues. *Smart Mater. Struct.*, 1992, vol. 1, no. 1, pp. 36-44.
7. Matveenkov V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, vol. 25, no. 3, p. e2118.
8. Davis M.A., Bellemore D.G., Kersey A.D. Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array. *Second European Conference on Smart Structures and Materials. Proc. SPIE*, 1994, vol. 2361, pp. 342-345.
9. Rao Y.J., Kalli K., Brady G., Webb D.J., Jackson D.A., Zhang L., Bennion I. Spatially-multiplexed fibre-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection. *Electronics Letters*, 1995, vol. 31, no. 12, pp. 1009-1010.
10. Triana C.A., Pastor D., Varón M. A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, p. 2508.
11. Triana C.A., Pastor D., Varón M. Optical code division multiplexing in the design of encoded fiber Bragg grating sensors. *Opt. Pura Apl.*, 2016, vol. 49, no. 1, pp. 17-28.
12. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.J. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 535-543.
13. Agliullin T., Gubaidullin R., Sakhabutdinov A., Morozov O., Kuznetsov A., Ivanov V. Addressed fiber Bragg structures in load-sensing wheel hub bearings. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, p. 6191.
14. Morozov O., Sakhabutdinov A., Anfinogentov V., Misbakhov R., Kuznetsov A., Agliullin T. Multi-addressed fiber Bragg structures for microwave-photonic sensor systems. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, p. 2693.
15. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I., Misbakhov R.S. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on gratings with two symmetrical pi-phase shifts. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1368, no. 2, p. 022048.

16. Agliullin T.A., Gubaidullin R.R., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Z. Mathematical modeling of the optical response from addressed fiber Bragg structure based on lorentz function. *XVII International Scientific and Technical Conference "Optical Technologies for Telecommunications". Proc. of SPIE*, 2020, vol. 11516, p. 1151614.

17. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I., Misbakhov R.S. Modelling and record technologies of address fiber Bragg structures based on two identical ultra-narrow gratings with different central wavelengths. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1368, no. 2, p. 022049.

18. Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh., Ivanov V. Application of Gaussian function for modeling two-frequency radiation from addressed FBG. *Proceedings of Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2020, pp. 1-4.

Сведения об авторах

МОРОЗОВ О.Г.

e-mail: microoil@mail.ru

Заведующий кафедрой радиопотоники и микроволновых технологий, профессор, д.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

САХАБУТДИНОВ А.Ж.

e-mail: kazanboy@yandex.ru

Профессор кафедры радиопотоники и микроволновых технологий, доцент, д.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

НУРЕЕВ И.И.

e-mail: IINureev@kai.ru

Профессор кафедры радиопотоники и микроволновых технологий, доцент, д.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

About the authors

MOROZOV O.G.

e-mail: microoil@mail.ru

Head of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Professor, Doctor of Technical Sciences, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

SAKHABUTDINOV A.Zh.

e-mail: kazanboy@yandex.ru

Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

NUREYEV I.I.

e-mail: IINureev@kai.ru

Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

МИСБАХОВ Р.Ш.

e-mail: RuShMisbakhov@kai.ru

Доцент кафедры естественнонаучных дисциплин и информационных технологий, к.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Альметьевский филиал

КУЗНЕЦОВ А.А.

e-mail: AAKuznetsov@kai.ru

Профессор кафедры радиопhotоники и микроволновых технологий, доцент, д.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

АГЛИУЛЛИН Т.А.

e-mail: taagliullin@mail.ru

Доцент кафедры радиопhotоники и микроволновых технологий, к.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

АРТЕМЬЕВ В.И.

e-mail: VIArtemev@kai.ru

Доцент кафедры радиопhotоники и микроволновых технологий, к.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

ИВАНОВ А.А.

e-mail: aleste1@mail.ru

Доцент кафедры радиопhotоники и микроволновых технологий, к.т.н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

MISBAKHOV R.Sh.

e-mail: RuShMisbakhov@kai.ru

Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Information Technologies, Ph.D., Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI, Almet'yevsk branch

KUZNETSOV A.A.

e-mail: AAKuznetsov@kai.ru

Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

AGLIULLIN T.A.

e-mail: taagliullin@mail.ru

Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Ph.D., Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

ARTEMYEV V.I.

e-mail: VIArtemev@kai.ru

Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Ph.D., Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

IVANOV A.A.

e-mail: aleste1@mail.ru

Associate Professor of the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies, Ph.D., Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

ЗАКАМСКИЙ В.К.

e-mail: *volodya_zakamskiy@mail.ru*

Студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

ZAKAMSKY V.K.

e-mail: *volodya_zakamskiy@mail.ru*

Student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

КАЗАКОВ Н.А.

e-mail: *nikita.kazakov25@yandex.ru*

Студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

KAZAKOV N.A.

e-mail: *nikita.kazakov25@yandex.ru*

Student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 22.09.2023

Одобрена: 26.09.2023

Принята к публикации: 27.09.2023

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study was not sponsored.

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 22/09/2023

Approved: 26/09/2023

Accepted for publication: 27/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Четырехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры – новый элемент радиопотонных многосенсорных сетей / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, Рус.Ш. Мисбахов, А.А. Кузнецов, Т.А. Аглиуллин, В.И. Артемьев, А.А. Иванов, В.К. Закаmsкий, Н.А. Казаков // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 43–65.

Please cite this article in English as: Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Misbakhov Rus.Sh., Kuznetsov A.A., Agliullin T.A., Artemiev V.I., Ivanov A.A., Zakamsky V.K., Kazakov N.A. Fiber-optic temperature sensor based on glass Fabry – Perot interferometer // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 43-65.