

EDN: VAGHVR  
УДК 621.383

2.2.6, 2.2.7, 2.2.8

## АДРЕСНАЯ ВОЛОКОННАЯ БРЭГГОВСКАЯ СТРУКТУРА С ВОЛНОВОЙ И ФАЗОВОЙ КОМПОНЕНТАМИ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ РАДИОФОТОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Рус. Ш. Мисбахов<sup>1</sup>, Е.В. Куликов<sup>2</sup>, В.И. Артемьев<sup>1</sup>, Г.А. Морозов<sup>1</sup>,  
Э.В. Белов<sup>1</sup>, А.А. Силантьева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

<sup>2</sup>ФГБУ «З Центральный научно-исследовательский институт»  
Министерства обороны Российской Федерации  
Российская Федерация, 107564, Москва, Погонный пр-д, 10

**Аннотация.** Представлены методы анализа и принципы формирования адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами как нового инструмента радиофотонных технологий и сформулированы задачи для создания на их основе радиофотонных квазираспределенных адресных сенсорных систем мониторинга и технического диагностирования трубопроводов электростанций (пример применения). Обоснована необходимость синтеза адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами, разработана их математическая модель, определены особенности основного адреса структуры и множество ее дополнительных адресов, являющихся ключевыми для обработки оптической информации в радиодиапазоне. По результатам анализа оптомеханики адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами предложены радиофотонные технологии их интерропагации и структура радиофотонной квазираспределенной адресной сенсорной системы определения температуры трубопровода при работе сенсоров на отражение. Даны практические рекомендации по записи исследуемых структур в волокне.

**Ключевые слова:** адресная волоконная брэгговская структура, волновая компонента, фазовая компонента, оптомеханика, радиофотонные сенсорные технологии, особенности работы структуры на отражение, запись брэгговской структуры в волокне, мониторинг и техническое диагностирование трубопроводов электростанций, радиофотонная квазираспределенная адресная сенсорная система определения температуры трубопровода

### Введение

В последнее время созрела настоятельная необходимость в оптимизации обслуживания, направленного на повышение как надежности, так и эффективности работы трубопроводного транспорта тепловых и атомных электростанций. Столкнувшись с длительным периодом эксплуатации существующих трубопроводов (ТП) и необходимостью строительства новых конструкций, требуется разработать стратегию, увеличивающую периоды непрерывной и безопасной эксплуатации, что позволит реже проводить мероприятия по их обслуживанию [1, 2]. Наблюдается растущая тенденция перехода от концепции профилактического (планового) обслуживания к диагностическому, в зависимости от состояния ТП и его компонентов. В связи с указанной тенденцией должны быть разработаны и внедрены различные методы онлайн мониторинга состояния ТП, мониторинга их структурной целостности, неразрушающие методы контроля и технического диагностирования. Выбор компонентов ТП для обслуживания на основе онлайн мониторинга и ключевых параметров для мониторинга структурной целостности, оценка результатов мониторингов - вопрос, влияющий на эффективность технического диагностирования ТП [3, 4].

Следует отметить, что онлайн мониторинг (ОЛМ) состояния ТП используется в большей мере в отношении атомных электростанций в силу их более существенного негативного влияния на окружающую среду и экономику в случае аварии, а мониторинг структурной целостности (МСЦ) или техническое диагностирование (ТД) – в отношении тепловых электростанций [5-6]. ОЛМ включает в себя обнаружение и диагностику отклонений посредством долгосрочного наблюдения за сигналами процессов во время эксплуатации ТП. Согласно определений МАГАТЭ, Россетей, Ростехнадзора термин ОЛМ относится к следующей ситуации: контролируемый ТП находится в эксплуатации, активен и доступен (онлайн); ТП работает, включая запуск, нормальную стационарную работу и переходный режим отключения; тестирование проводится на месте неразрушающим, пассивным способом. МСЦ определяется как процесс реализации стратегии обнаружения повреждений: наблюдение за ТП с течением времени с использованием периодически отбираемых измерений динамического отклика из сети датчиков; извлечение чувствительных к повреждениям ключевых характеристик из этих измерений и статистический анализ этих характеристик для определения текущего состояния ТП и, если возможно, прогноза срока его службы. В ТД ТП предусмотрена и активная фаза его отключения в случае определения признаков возникновения аварии, которое производится, как правило, с выводом ТП из эксплуатации или в период технического обслуживания (ТО).

Наиболее важными преимуществами внедрения комплексной системы онлайн мониторинга и технического диагностирования (МТД) являются предотвращение преждевременных поломок, снижение затрат на ТО, удаленные контроль и диагностика, а также повышение коэффициента эффективности использования ТП. На современном этапе развитие МТД в значительной степени сосредоточено на создании своего рода «интеллектуальной сенсорной сети» для мониторинга элементов ТП и параметров процессов в них, в то время как ОЛМ занимается выбором параметров и компонентов для мониторинга с использованием существующей сенсорной техники и оценкой результатов мониторинга.

Прямые и косвенные методы МТД ТП разнообразны и подробно рассмотрены в различных источниках. В отличие от традиционных программных и инструментальных подходов, базирующихся на различных физических принципах, волоконно-оптические методы становятся все более важным инструментом для МТД ТП, благодаря своим уникальным преимуществам в чувствительности, возможности мультиплексирования и невосприимчивости к электромагнитным помехам, что особенно важно для работы на ТП ЭС [7, 8].

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) – одна из самых популярных технологий волоконно-оптических датчиков (ВОД), обладает рядом преимуществ по сравнению с обычными электрическими, ультразвуковыми и пьезоэлектрическими датчиками – малый размер, легкий вес, взрывозащищенность, химическая стабильность, гибкость, устойчивость к электромагнитным помехам и возможность мультиплексирования для организации квазиаспределенных сенсорных сетей.

Датчики на ВБР можно легко закрепить на поверхности труб, практически не влияя на их динамические характеристики, так как его размеры и вес невелики. Кроме того, этот тип датчика подходит для работы в сети, которая может быть плотно мультиплексирована, а также может работать в легковоспламеняющейся среде с серьезными электромагнитными помехами.

Одно из основных направлений применения датчиков на ВБР – измерение деформации или других параметров, сводимых к давлению, что делает их очень подходящими для ряда частных приложений МТД ТП.

ВБР кодируется информацией о длине волны в оптическом диапазоне, что делает датчик ВБР самокалибрующимся и независимым от колебаний уровня освещенности. Воз-

можности крупномасштабного мультиплексирования могут позволить датчикам ВБР обнаруживать квазираспределенные вибрации и изменения давления вдоль ТП и в отдельных его точках. Однако кодирование по длине волны не отвечает требованиям эффективной адресности ВОД и для опроса требует дорогостоящих и не всегда пригодных для работы в полевых условиях устройств опроса оптико-электронных интеррораторов. Неудивительно, что многие исследователи предпочли методам на основе ВБР другие физические механизмы, основанные на рассеяниях Рэлея, Бриллюэна и Рамана. Однако их стоимость и сложность эксплуатации в несколько раз перекрывают указанные параметры для квазираспределенных систем мониторинга на ВБР.

Проблема возврата к квазираспределенному мониторингу и его адресной модификации была решена в Казанской школе радиофотоники КНИТУ-КАИ, которая предложила заменить ВБР на адресные волоконные брэгговские структуры (АВБС). Общим преимуществом АВБС является возможность их мультиплексирования по адресным радиочастотам и реализация радиофотонного опроса, что позволяет строить многосенсорные мультипара-метрические сети с высокой точностью и низкой стоимостью измерений за счет замены оптоэлектронных интеррораторов на радиофотонные [9, 10].

Классические двухкомпонентные АВБС делятся на два типа: волновые ( $2\lambda$ -АВБС), состоящие из двух однородных по фазе ВБР с разными центральными длинами волн, разнесенными на адресную радиочастоту, и фазовые ( $2\pi$ -АВБС), представляющие собой ВБР, содержащую два фазовых  $\pi$ -сдвига, также разнесенных на адресную радиочастоту. С одной стороны,  $2\lambda$ -АВБС проще мультиплексируются по топологии «последовательная шина», оптимальная топология для  $2\pi$ -АВБС – «параллельная шина». С другой стороны,  $2\pi$ -АВБС позволяют получить высокую разрешающую способность измерений в силу более узкой полосы пропускания окон прозрачности (единицы-десятки МГц), чем спектр отражения ВБР у  $2\lambda$ -АВБС (сотни МГц – единицы ГГц). Поэтому одной из главных задач является создание АВБС, обладающей преимуществами обоих описанных типов структур и состоящей из одной волновой и одной фазовой ВБР с одним фазовым  $\pi$ -сдвигом как ее компонент.

Обозначим такую АВБС с волновой и фазовой компонентами как  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

По решению достаточно типовой задачи измерения температуры можно сравнить новые полученные результаты с аналогичными и верифицировать их. Вероятность получения преимуществ  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по сравнению с  $2\lambda$ -АВБС и  $2\pi$ -АВБС основывается, во-первых, на том, что несмотря на двухкомпонентность  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, фактически ее можно отнести к виду трехкомпонентных, которые, как известно, более устойчивы к межадресным коллизиям; во-вторых, процесс записи компоненты с одним фазовым  $\pi$ -сдвигом существенно проще, чем с двумя; в-третьих, поскольку ее окно прозрачности достаточно узкое, можно сформировать дополнительный адрес в структуре  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, который лежит в области десятков МГц – единиц ГГц, и использовать в структуре радиофотонного интерроратора более дешевый узкополосный фотоприемник. Вероятность получения преимуществ  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по сравнению с трехкомпонентными  $3\lambda$ -АВБС и  $3\pi$ -АВБС основывается на том, что при всех преимуществах двух последних, изготовление первых существенно проще, при этом преимущества трехкомпонентных АВБС сохраняются и в  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Отмеченные обстоятельства обуславливают актуальность темы и постановку научно-технической задачи разработки  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС для мониторинга ключевых параметров эксплуатации и ТД ТП, сводимых в данной статье к измерению температуры. Различные задачи измерения вибраций и давления в ТП будут рассмотрены в других работах.

Тематика и содержание работы соответствуют планам научных исследований, выполняемых в КНИТУ-КАИ, в том числе в рамках программы «Приоритет-2030» Минобрнауки РФ. Объект исследования – волоконные брэгговские решетки и структуры как инструмент реализации оптоэлектронных и радиофотонных технологий мониторинга и тех-

нического диагностирования трубопроводов электростанций. Предмет исследования – адресные волоконные брэгговские структуры с волновой и фазовой компонентами как новый инструмент реализации радиофотонных технологий мониторинга и технического диагностирования трубопроводов электростанций и радиофотонные системы на их основе.

Далее в статье представлены результаты:

1) обоснования необходимости применения радиофотонных технологий на основе использования адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами как нового инструмента МТД ТП;

2) построение математической модели спектральной характеристики адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами, определение по ней основного и дополнительных адресов структуры;

3) анализ оптомеханики адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами;

4) определение радиофотонных технологий интерропации адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами при работе на отражение в режиме определения температуры;

5) анализ и выбор методов записи исследуемых структур в волокне.

## **1. Обоснование необходимости построения радиофотонных квазираспределенных сенсорных систем на основе использования в них адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами**

На основе анализа основных аспектов контроля структурной целостности ТП, определенных экономическими факторами, а также статистики неисправностей, собранной на основе практики их эксплуатации в энергосистеме страны, были сделаны прогнозы по развитию систем контроля ТП на мировом уровне, рекомендованные ГОСТ РФ параметры контроля и требования к процедурам их проведения в России. Среди этих параметров и процедур наиболее экономичными и глобальными являются методы мониторинга собственной частоты колебаний (вибраций) ТП и техническое диагностирование по параметрам управляемых ударных волн давления в них, как наиболее информативным, обладающим малой стоимостью и малыми рисками влияния на всю систему ТП в целом.

На основе анализа особенностей и проблем существующих методов контроля собственных частот колебаний, параметров ударных волн и взаимодействия ТП с опорами предложено организовать интеллектуальные сенсорные вставки в зоне последних [11-19]. Кроме того, проблемы существующих методов онлайн мониторинга ТП подтверждают, что существует потребность в новых методах, которые могут применяться к различным ТП ЭС и обнаруживать дефекты с высокой точностью в течение длительного периода времени. Одной из потенциальных технологий, отвечающей критериям создания таких методов, является волоконно-оптическая квазираспределенная технология, на базе которой формируются сети ВБР с известными их преимуществами.

Рассмотренные оптико-электронные технологии МТД с ВБР, датчики на их основе и методы установки датчиков на ТП позволяют обнаруживать широкий спектр возмущений – температуру, деформацию, давление, акустические колебания, течение и др. Рассматриваемые три ключевых параметра для онлайн МТД могут быть сведены к температуре и давлению и их изменениям. Приведенный анализ достоинств и недостатков указанных датчиков позволил сформировать две задачи: 1) обоснование перехода к радиофотонным технологиям контроля; 2) создание новых АВБС на основе ВБР, адаптированных к ним. Эти задачи являются следствием применения низкочастотных и сверхдорогих интерропаторов ВБР, реализующих указанные оптико-электронные технологии в настоящее время.

ТП работают в условиях переменных температур, как при нормальной эксплуатации, так и еще в большей мере в процессах останова и расхолаживания, а также при разогреве и

пуске после останова. В результате изменения температуры среды меняется температура металла, а поэтому и длина трубопроводов. Если не обеспечить возможность свободного удлинения ТП, то в их металле могут возникнуть дополнительные напряжения, величина которых зависит от температуры среды. Это в ряде случаев может привести к разрушению труб. Поэтому температура также является ключевым параметром МТД ТП как самостоятельная величина, так и величина для компенсаций измеряемых давлений.

Оценка возможности решения задачи синтеза новых АВБС для решения частных задач онлайн МТД ТП по температуре проведена на основе анализа преимуществ и недостатков только волновых или только фазовых типов АВБС. Преимуществ АВБС множество [20-22], но существуют и недостатки их применения. Поэтому для решения задач по развитию АВБС и устранению их недостатков предлагается новый тип АВБС комбинированный – с волновой и фазовой компонентами. Обоснование необходимости применения радиофотонных технологий может быть выполнено на примере радиофотонной квазираспределенной адресной сенсорной системы измерений температуры ТП.

## 2. Математическая модель для описания спектральной характеристики адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами

Математическая модель  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС, синтезированная с использованием методов матриц передачи и связанных мод показала формирование трехчастотного спектрального отклика структуры на отражение с дополнительными адресными длинами волн  $\Delta\lambda_{AD1-3}$ . Поскольку основная адресная длина волны  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС  $\Delta\lambda_{AO}$  неявная (рис. 1), она не может быть определена только в режиме работы на отражение или пропускание.

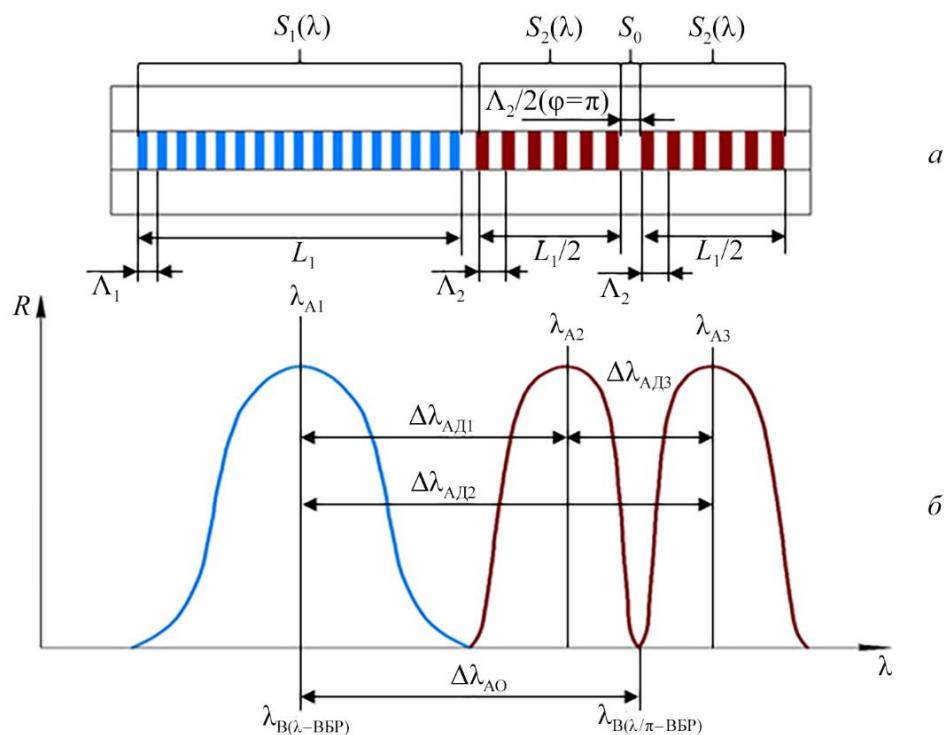


Рис. 1. АВБС с волновой и фазовой компонентами:  
а – структура; б – условная спектральная характеристика отражения

Особенности одновременной работы такой структуры и на отражение, и на пропускание будут определять ее существенные особенности и преимущества перед предшественниками, очевидно с некоторым усложнением схемы интерропации, что будет рассмотрено в других работах авторов.

Для дальнейших рассуждений перейдем от термина «адресная разность длин волн» к термину «адресная частота», поскольку последняя лежит в радиодиапазоне (пропорция пересчета – разность длин волн в 1 нм составляет 125 ГГц).

Результирующая матрица  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС ( $S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}$ ) запишется в виде суммы результирующих матриц  $\lambda$ -ВБР и  $\lambda/\pi$ -ВБР:

$$S_{\text{res } 1}(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1} - r_1(\lambda)^2 \cdot e^{-i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1}}{1 - r_1(\lambda)^2} & \frac{-r_1(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1} + r_1(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1}}{1 - r_1(\lambda)^2} \\ \frac{r_1(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1} - r_1(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1}}{1 - r_1(\lambda)^2} & \frac{e^{-i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1} - r_1(\lambda)^2 \cdot e^{i \cdot q_1(\lambda) \cdot l_1}}{1 - r_1(\lambda)^2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $l_1 = L_1$  – длина  $\lambda$ -ВБР,  $r_1(\lambda) = [q_1(\lambda) - (2 \cdot \pi \cdot (1/\lambda - 1/\lambda_1))] / k$ ,  $q_1(\lambda) = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot (1/\lambda - 1/\lambda_1))^2 - k^2}$ ,  $\lambda_1$  – центральная брэгговская длина волны  $\lambda$ -ВБР,  $k = \pi \cdot \sigma n / \lambda_1$  – постоянная распространения,  $\sigma n = n_{\text{mod}} / n_{\text{eff}}$  – индекс модуляции коэффициента преломления,  $n_{\text{mod}}$  – величина наведенного показателя преломления,  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления сердцевины волокна;

$$S_{\text{res } 2}(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda)^2 \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} & \frac{-r_2(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} + r_2(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} \\ \frac{r_2(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} & \frac{e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda)^2 \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} e^{-\varphi} & 0 \\ 0 & e^{\varphi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda)^2 \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} & \frac{-r_2(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} + r_2(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} \\ \frac{r_2(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda) \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} & \frac{e^{-i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2} - r_2(\lambda)^2 \cdot e^{i \cdot q_2(\lambda) \cdot l_2}}{1 - r_2(\lambda)^2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $l_2 = L_1/2$  – длина второй и третьей секций  $\lambda/\pi$ -ВБР,  $r_2(\lambda) = [q_2(\lambda) - 2 \cdot \pi \cdot (1/\lambda - 1/\lambda_2)] / k$ ,  $q_2(\lambda) = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot (1/\lambda - 1/\lambda_2))^2 - k^2}$ ,  $\lambda_2$  – центральная брэгговская длина волны второй ВБР,  $k = \pi \cdot \sigma n / \lambda_2$  – постоянная распространения;

$$S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda) = S_{\text{res } 1}(\lambda) + S_{\text{res } 2}(\lambda). \quad (3)$$

Спектры отражения и пропускания  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС определяются выражениями:

$$R_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda) = \left( \left| \frac{S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{21}}{S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{22}} \right| \right)^2; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda) = \\ = \left( \left| S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{11} - \frac{S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{12} S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{21}}{S_{\text{res } (\lambda + \lambda/\pi) - \text{АВБС}}(\lambda)_{22}} \right| \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Преимуществом использования в качестве чувствительного элемента ВОД на  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по сравнению с АВБС других видов является формирование адреса как в гига-, так и мегагерцевом диапазоне, что позволяет в ряде приложений снизить стоимость радиофотонного интерропратора по фотоприемнику, а также получить возможность различать малые сдвиги двух АВБС относительно друг друга.

### 3. Анализ оптомеханики адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами

Были проведены исследования математической модели для различных случаев изменения параметров  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС: периода, наведенного показателя преломления, длины однородных участков, величины фазовых сдвигов. Среди различных полученных результатов отметим главные – отсутствие изменений в величинах адресных частот и получение значений параметров для аналитических выражений управления основным и дополнительными адресными частотами  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при равномерном изменении периодов секций структуры в диапазоне 0,1 нм по периоду, что в принципе соответствует изменению, например, деформации, вызванной растяжением ВОД и изменением температуры в общем диапазоне 3 нм. Результаты математического моделирования показывают, что при равномерном изменении периодов секций в данном диапазоне происходит пропорциональный сдвиг центральных длин волн  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС и ее компонент, при этом изменение периода секций не оказывает влияния на адресную и спектральную характеристики структуры.

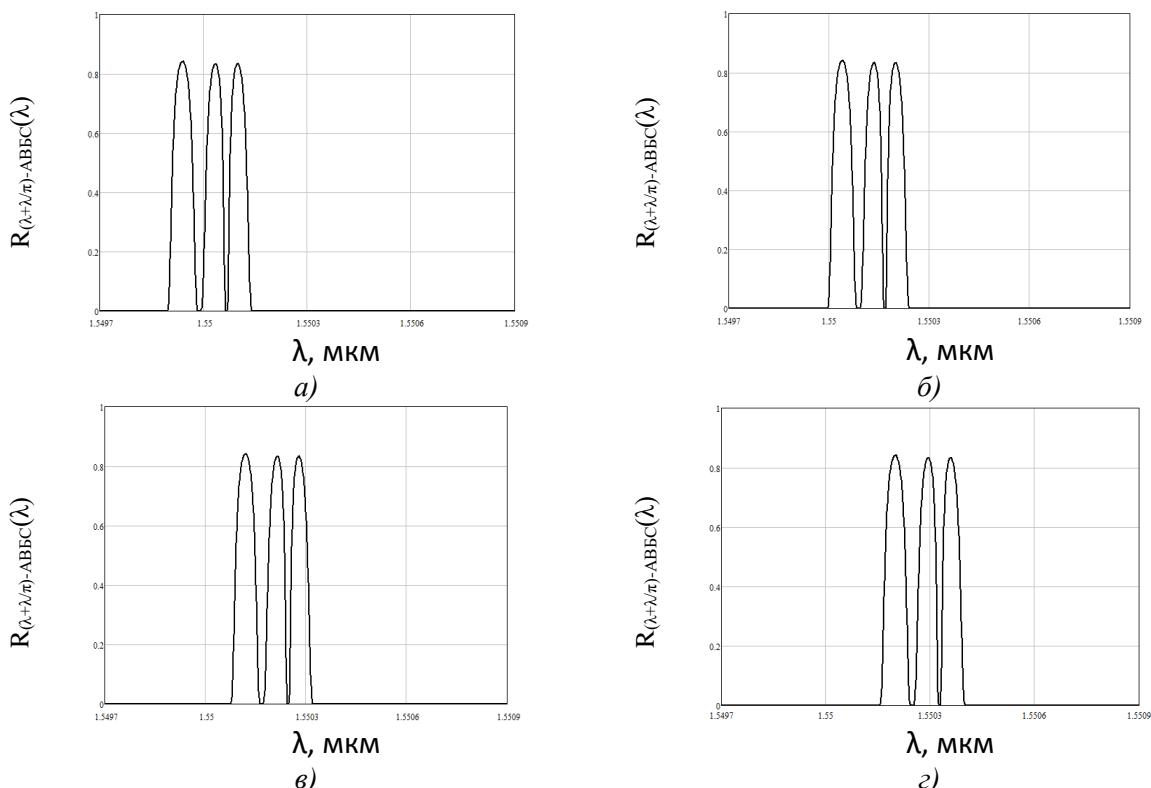


Рис. 2. Спектры  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при равномерном изменении периода:  
a)  $\Lambda_\lambda = 0.53080$  мкм;  $\Lambda_\pi = 0.53084$  мкм, б)  $\Lambda_\lambda = 0.53083$  мкм;  $\Lambda_\pi = 0.53087$  мкм,  
в)  $\Lambda_\lambda = 0.53086$  мкм;  $\Lambda_\pi = 0.53090$  мкм, г)  $\Lambda_\lambda = 0.53089$  мкм;  $\Lambda_\pi = 0.53093$  мкм

На рис. 3 представлены спектральные характеристики  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при различных значениях величины наведенного показателя преломления  $n_{mod}$ .

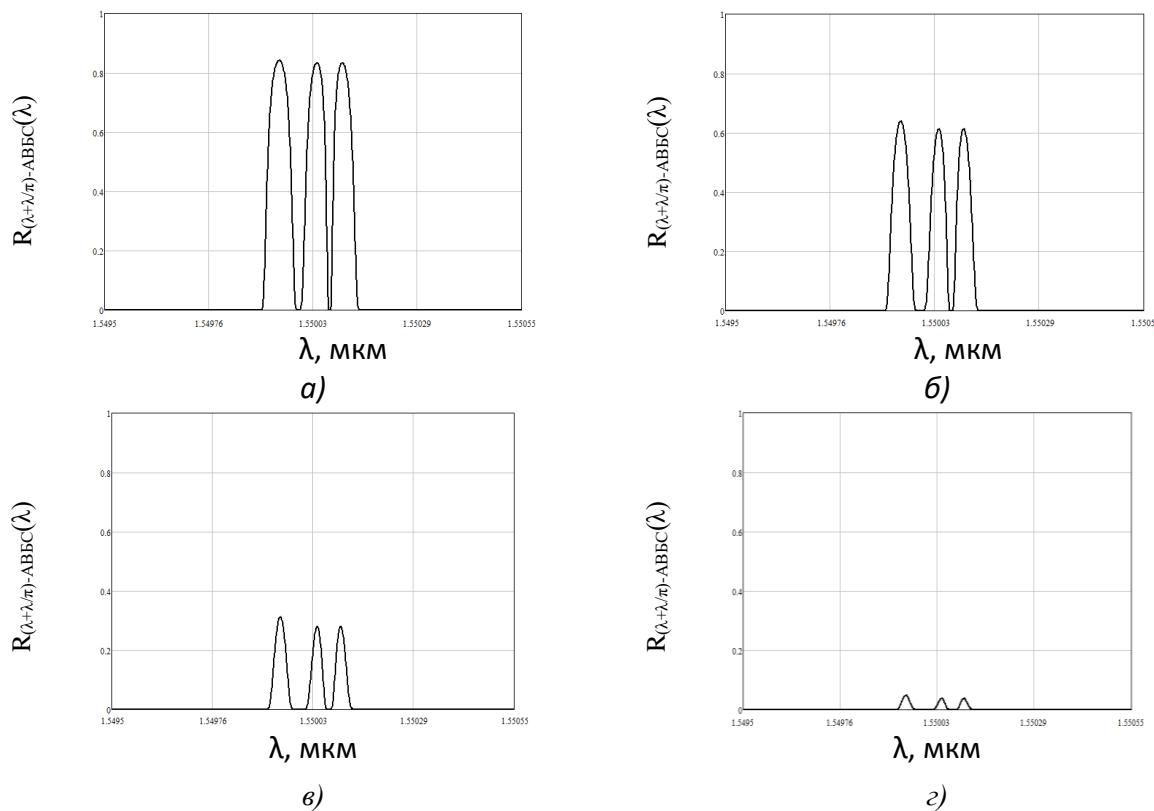


Рис. 3. Спектры  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении  $n_{mod}$ :  
 а)  $n_{mod.\lambda-BBR} = 5.7 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_{mod.\pi-BBR} = 7.5 \cdot 10^{-5}$ , б)  $n_{mod.\lambda-BBR} = 4.56 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_{mod.\pi-BBR} = 6 \cdot 10^{-5}$ ,  
 в)  $n_{mod.\lambda-BBR} = 3.42 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_{mod.\pi-BBR} = 4.5 \cdot 10^{-5}$ , г)  $n_{mod.\lambda-BBR} = 2.28 \cdot 10^{-5}$ ;  $n_{mod.\pi-BBR} = 3 \cdot 10^{-5}$

Результаты математического моделирования показывают, что при уменьшении величины наведенного показателя преломления  $n_{mod}$  происходит уменьшение коэффициента отражения компонент  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, при этом адресные частоты  $f_{AO}$  и  $f_{ADZ}$  остаются постоянными.

На рис. 4 представлены спектральные характеристики  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении длины  $\lambda/\pi$ -ВБР в диапазоне от 20 до 40 мм.

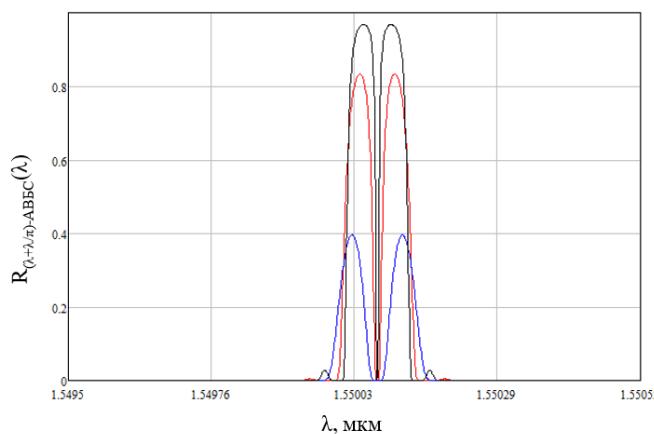


Рис. 4. Спектральная характеристика  $\lambda/\pi$ -ВБР при изменении ее длины  $L_{\lambda/\pi-BBR}$ :  
 20 мм (синяя линия); 30 мм (красная линия); 40 мм (черная линия)

Из рис. 4 видно, что полоса пропускания окна прозрачности уменьшается с увеличением длины  $L \lambda/\pi$ -ВБР. При этом изменяется длина волны компонент с максимальным отражением  $\lambda_{A2}$ ,  $\lambda_{A3}$  и значение дополнительной адресной частоты  $f_{Ad3}$ .

На рис. 5 приведен график, дающий представление об изменении полосы пропускания  $\lambda/\pi$ -ВБР от  $L_{\lambda/\pi}$ -ВБР для различных значений  $n_{mod}$ .

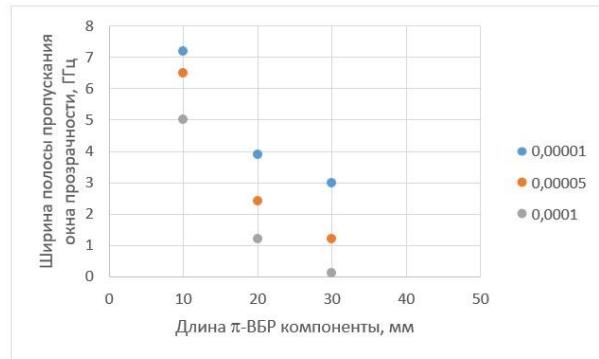


Рис. 5. Зависимость изменения полосы пропускания  $\lambda/\pi$ -ВБР от ее длины при  $\Delta n_{mod} = 0.00001, 0.00005, 0.0001$

В этом случае диапазон изменения дополнительных адресных частот  $f_{Ad3}$  также изменяется и при длине компоненты в 30 мм может достигать 7 ГГц, что в 2-5 раз меньше чем для классических двухкомпонентных волновых АВБС [9-10]. Такие частоты позволяют применить более узкополосные фотодетекторы и снизить стоимость радиофотонного адресного интерроргатора.

При переходе от  $n_{mod} \sim 10^{-5}$  к  $n_{mod} \sim 10^{-4}$  отмечается формирование плоской вершины у  $\lambda/\pi$ -ВБР (рис. 6).

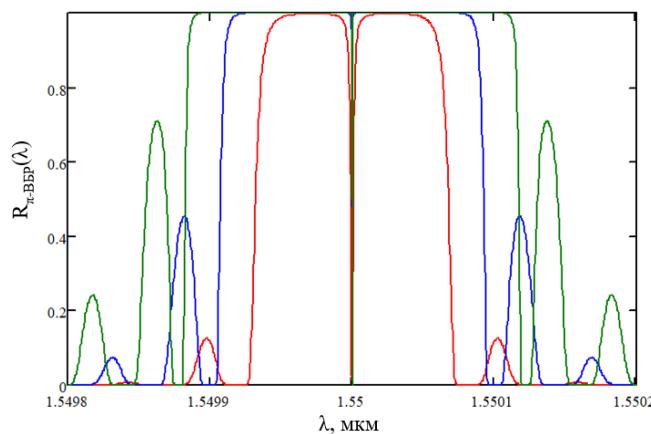


Рис. 6. Спектральная характеристика  $\lambda/\pi$ -ВБР при изменении наведенного показателя преломления:  
 $n_{mod,\pi\text{-BVR}} = 1 \cdot 10^{-4}$  (красная линия),  $n_{mod,\pi\text{-BVR}} = 1.5 \cdot 10^{-4}$  (синяя линия),  
 $n_{mod,\pi\text{-BVR}} = 2 \cdot 10^{-4}$  (зеленая линия)

Такие фазовые компоненты можно использовать при параллельном попарном включении  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС при работе на пропускание, когда необходимо минимизировать за светки фотоприемника, вызванные неполным перекрытием компонентами его спектра излучения, которое снижает эффективность преобразования излучения, прошедшего через окна прозрачности.

#### 4. Математическое моделирование принципа работы датчика на основе адресной волоконной брэгговской структуры с волновой и фазовой компонентами

При математическом моделировании принципа работы ВОД на основе  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС можно воспользоваться стандартными схемами опроса АВБС [20-22]. Для моделирования принципа работы системы на отражение воспользуемся схемой опроса двухкомпонентной волновой  $2\lambda$ -АВБС (рис. 7), как наиболее близкой по структуре к  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

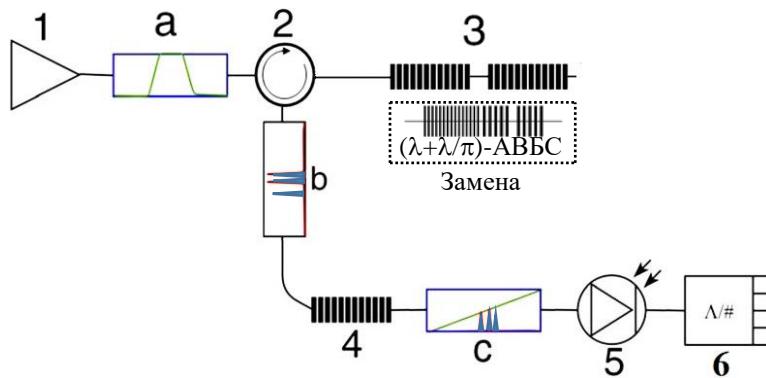


Рис. 7. Функциональная оптико-электронная схема радиофотонного интерроргатора для опроса  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС:

1 – широкополосный лазерный источник; 2 – циркулятор; 3 –  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС; 4 – оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой; 5 – фотоприемник; 6 – аналого-цифровой преобразователь; буквами а–с на рисунке схематично приведены спектры оптического сигнала на соответствующем участке схемы

При работе на отражение в  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС используются три элемента:  $\lambda$ -ВБР и две отражающих части  $\lambda/\pi$ -ВБР. Отличие схемы, представленной на рис. 7 от исходной [20], заключается в том, что вместо  $2\lambda$ -АВБС 3 будет использоваться  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС (показано пунктиром) и соответственно вместо двухчастотного сигнала (b и c) будет формироваться трехчастотный сигнал с максимально отражением, соответствующим длинам волн  $\lambda_{A1}$ ,  $\lambda_{A2}$ ,  $\lambda_{A3}$ . В схеме опроса оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой 4 (ОФНЛХ) необходим для определения смещения основной адресной частоты  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по изменению амплитуд трех адресных составляющих  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при режиме работы на отражение [20-22].

Математическую модель линейного наклонного фильтра 4 можно записать в виде уравнения прямой линии с углом наклона  $u$  и смещением по оси ординат  $v$  [20-22]:

$$L(\lambda) = u \cdot \lambda + v. \quad (6)$$

Моделирование проводилось в программной среде MathCad. Типовое изменение давления с 30 до 130 МПа вызовет изменение центральной длины волны Брэгга  $\sim 1$  нм. Диапазон измерения температуры, как основного фактора, вызывающего равномерную деформацию структуры ТП составляет от 5 до 150 °С, что составит при стандартной чувствительности ВБР к температуре  $\sim 1,5$  нм. При применении метода ударной волны можно добавить  $\sim 0,5$ -1,5 нм сдвига длины волны за счет перепада давления в ТП [23-28]. Таким образом, параметры линейного наклонного фильтра  $u$  и  $v$  были выбраны таким образом, чтобы

наклонный фильтр покрывал весь диапазон измерения линейной деформации по температуре и давлению в стационарном и испытательном режимах  $\sim 4,5$  нм. Характеристика линейного наклонного фильтра, представлена на рис. 8.

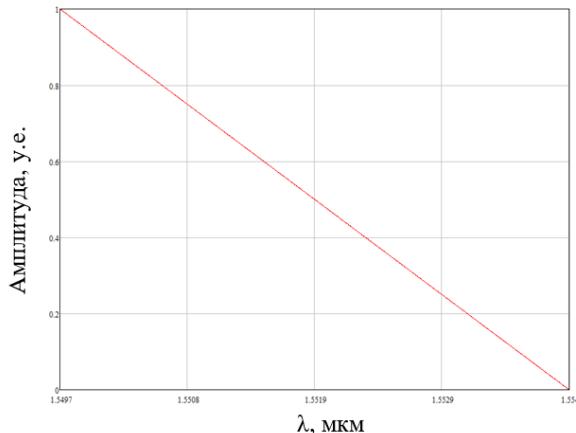


Рис. 8. Спектральная характеристика линейного наклонного фильтра

Предположим, что воздействие температуры (при стационарном давлении) вызывает равномерную деформацию  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС. В ходе математического моделирования центральная длина волны  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС будет смещаться в диапазоне 3 нм (от 1550 до 1553 нм, диапазон измерений, примерно 300 °C).

На рис. 9 представлены спектры отражения  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС на выходе фильтра 4 при различных значениях комплексного воздействия температуры на датчик.

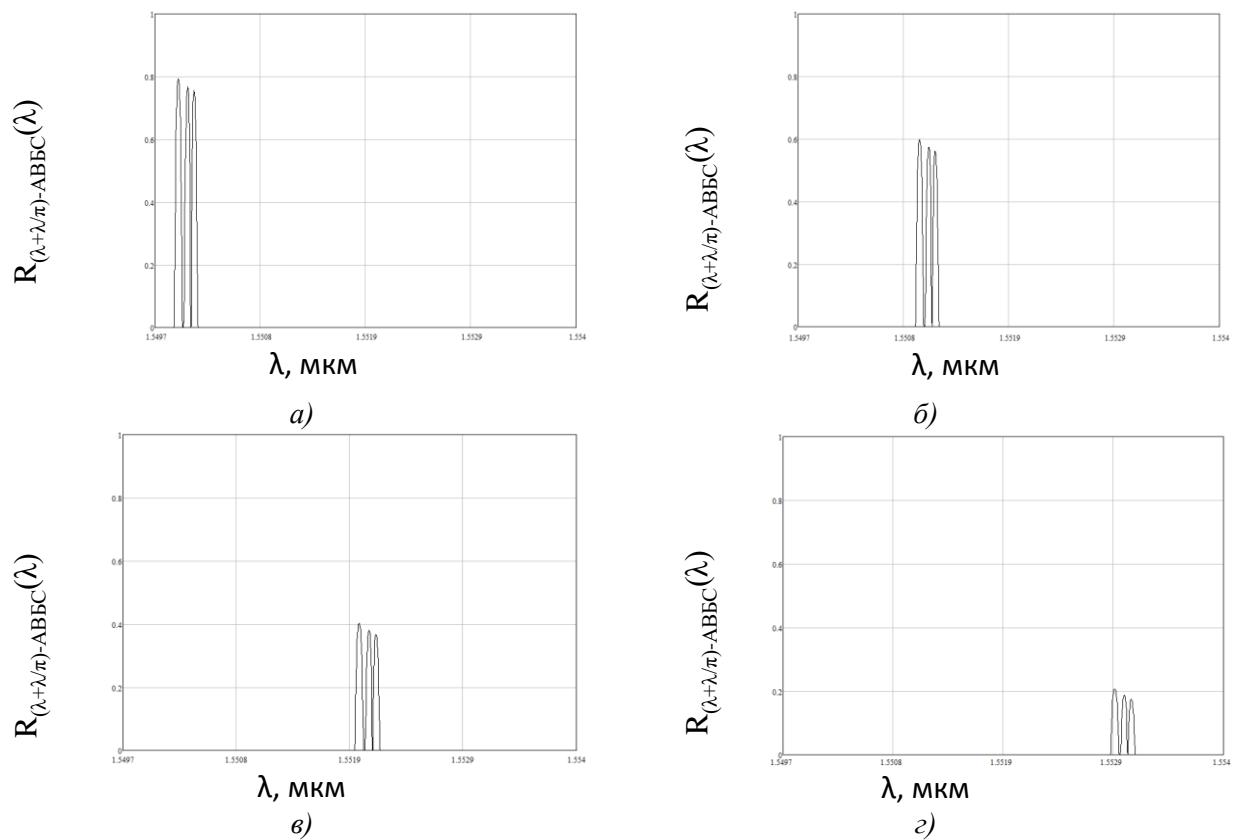


Рис. 9. Спектры отражения  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС при различных значениях воздействия температуры на датчик на выходе фильтра: а)  $T = 0$  °C, б)  $T = 100$  °C, в)  $T = 200$  °C, г)  $T = 300$  °C

Применим БПФ, выделим дополнительные адресные частоты, получим спектры сигналов биений на выходе узкополосного фотоприемника при работе на отражение (рис. 10). Для анализа выберем биение на  $f_{\text{АД1}} = 11,5$  ГГц.

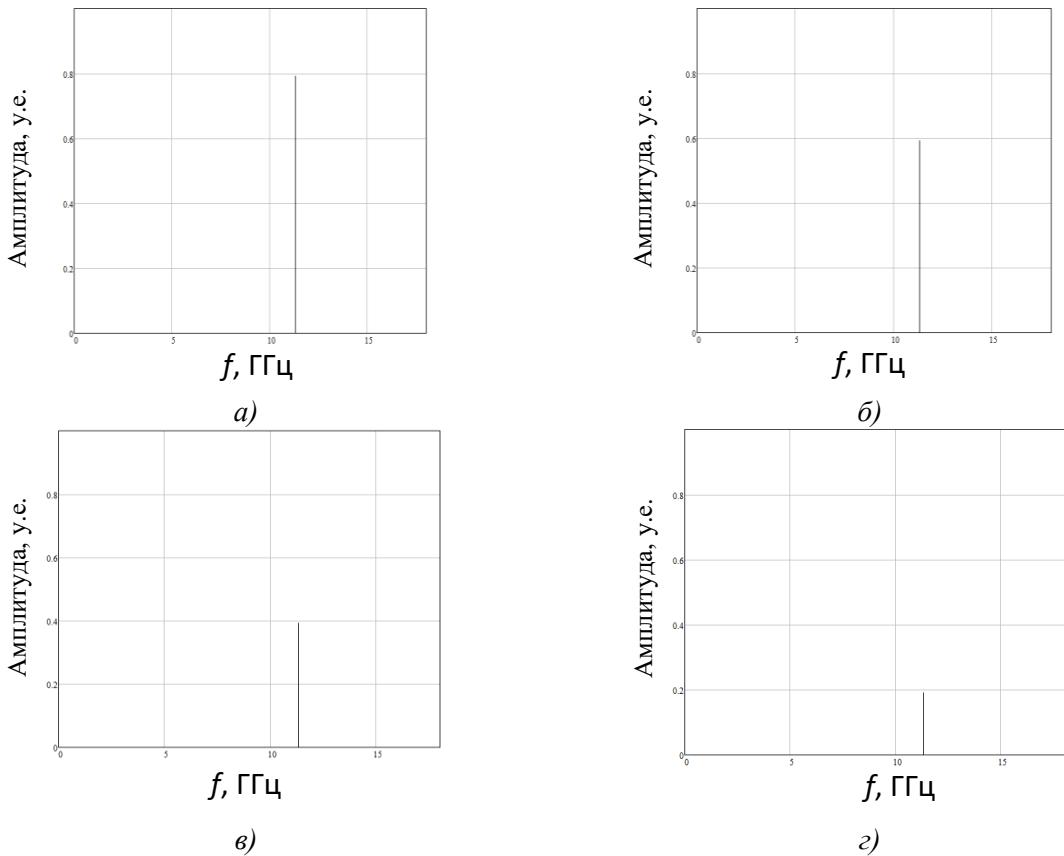


Рис. 10. Спектр сигнала биений при работе схемы на отражение для  $f_{\text{АД1}}$ :  
a)  $T = 0$  °C, б)  $T = 100$  °C, в)  $T = 200$  °C, г)  $T = 300$  °C

Анализ сигналов биений между отраженными компонентами будем проводить при допущении, что каждая составляющая биений является одночастотным колебанием с амплитудой, пропорциональной коэффициентам отражения компонент  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ . Такая возможность была обоснована в работах [9, 10, 20-22] Казанской школы радиофотоники.

На рис. 11 представлена зависимость амплитуды сигнала биений от воздействия температуры на выходе избирательного фильтра при режиме работы схемы на отражение.

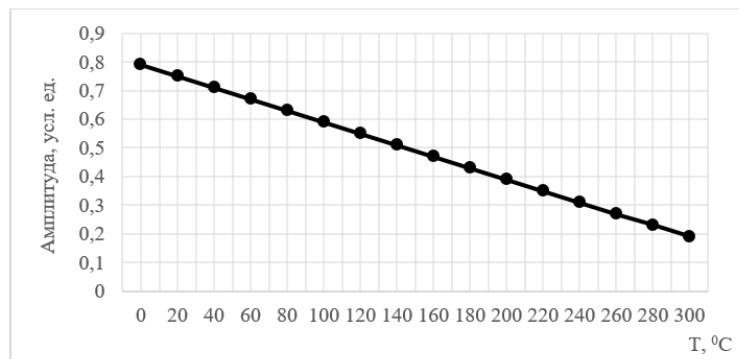


Рис. 11. Зависимость амплитуды сигнала биений от воздействия температуры на выходе фотоприемника

Результаты математического моделирования показали (линия тренда, рис. 11), что при увеличении температуры происходит равномерный сдвиг центральной длины волны  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, что в соответствии с характеристикой наклонного фильтра приводит к линейному уменьшению амплитуды сигнала биений в случае работы схемы на отражение. Данное обстоятельство показывает возможность использования разработанной структуры при контроле параметров температуры ТП.

На рис. 12 представлена обобщенная структурная схема квазираспределенной радиофотонной системы контроля температуры на протяженных участках ТП.

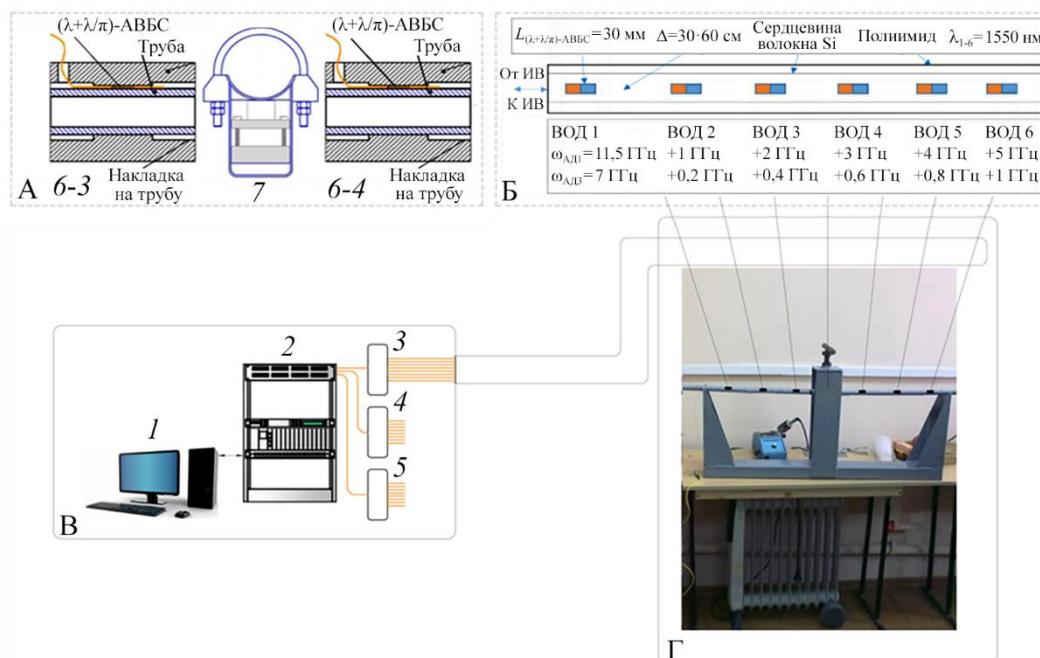


Рис. 12. Обобщенная структурная схема квазираспределенной радиофотонной адресной сенсорной системы контроля температуры для протяженных участков (А-В) и универсальный экспериментальный стенд для исследований по температуре и давлению (Г)

Схема подразделяется на четыре блока.

Блок «А» – иллюстративная схема крепления датчиков температуры (выбраны 3-й и 4-й датчики 6-3 и 6-4), между ними установлена типовая опора ТП, в теле которой размещен нагревательный элемент 7 для задания закона изменения температуры при исследованиях.

Блок «Б» – иллюстративная схема записи датчиков в волокне. Оптическое волокно содержит шесть последовательно записанных ВОД1-ВОД6, устанавливаемых на расстоянии 30-60 мм, что ограничено размерами трубы стенда. Число волокон в кабеле может быть и больше двух. Например, в третьем волокне ВОД могут располагаться со сдвигом по длине секции. Зоны установки датчиков могут быть защищены корпусами из полиэфир-эфир-кетона (ПЭЭК).

Блок «В» – диспетчерская. Блок «В» содержит АРМ оператора 1, где осуществляется непосредственный контроль за показаниями ВОД, шкаф АСУ 2, который содержит оптический кросс и радиофотонный интерропратор РФИ, а также оптический кросс типа ШКОН с оптическим сплиттером 1/N и оптические объединители 3-5. Для измерения температуры используется кросс 3.

Блок «Г» – общий вид экспериментального стенда с внедренными ВОД температуры на основе  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС (отмечено черным цветом).

Проведенные экспериментальные исследования показали хорошее совпадение результатов с результатами моделирования (точки, рис. 11). Погрешность составила  $\pm 0,01$   $^{\circ}\text{C}$ .

## 5. Технологии и оборудование для записи адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами

Основной акцент сделан на технологии записи с помощью ультрафиолетового аргонового лазера на станции записи НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ методом прецизионной прокладки и натяжения волокна.

Принцип работы оборудования заключается в использовании интерферометрических схем записи на основе интерферометров Ллойда или Тальботта для записи ВБР, а для смещения оптического волокна перпендикулярно записываемому пучку применяется моторизованная подвижка с точностью позиционирования на уровне  $\pm 5\ldots 10$  нм.

Для записи  $\lambda$ -ВБР компоненты волокно зажимается в столе моторизованной подвижке, которая управляется приводным механизмом, имеет максимальный диапазон перемещения 50 мм и не имеет люфта. Для записи  $\lambda/\pi$ -ВБР компоненты две стандартные ВБР записываются на одной и той же длине волны Брэгга, так что они имеют пространственное перекрытие, эквивалентное одному периоду решетки. Эта процедура повышает локальный показатель преломления центрального пересечения двух ВБР, что приводит к образованию фазового сдвига. Процесс изготовления является быстрым, воспроизводимым, имеет гибкий выбор длины волны Брэгга и позволяет изготавливать высококачественные  $\lambda/\pi$ -ВБР.

Процесс записи осуществлялся на оборудовании НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. Обе ВБР были изготовлены с использованием аргонового лазера мощностью 50 мВт, производства НГУ (Новосибирск), работающего на длине волны 248 нм. Контроль за записью ВБР осуществлялся с помощью оптического анализатора спектра FiberCom с разрешением 0,02 нм. Обе ВБР записывались в одномодовое волокно (СКЗ, Самара) на определенной центральной длине волны до тех пор, пока не была достигнута требуемая отражательная способность. Станция записи ВБР использует схему записи на основе интерферометра Ллойда и моторизованную подвижку STANDA 8MT17 для перемещения оптического волокна.

На рис. 13 представлен внешний вид станции записи.



Рис. 13. Внешний вид станции записи ВБР

На рис. 14 представлена спектральная характеристика АВБС с волновой и фазовой компонентами, записанной на описанном оборудовании. Записанная АВБС с волновой и

фазовой компонентами имеет следующие адресные частоты: дополнительная адресная частота  $f_{\text{АД1}} = 55$  ГГц, дополнительная адресная частота  $f_{\text{АД3}} = 6$  ГГц.

Как указывалось выше (рис. 6), при увеличении наведенного коэффициента преломления от  $10^{-5}$  к  $10^{-4}$  можно получить не гауссовые формы спектральных характеристик, а близкие к прямоугольным (рис. 15). Записанная АВБС с волновой и фазовой компонентами имеет следующие адресные частоты: дополнительная адресная частота  $f_{\text{АД1}} = 72$  ГГц, дополнительная адресная частота  $f_{\text{АД3}} = 0,24$  ГГц.

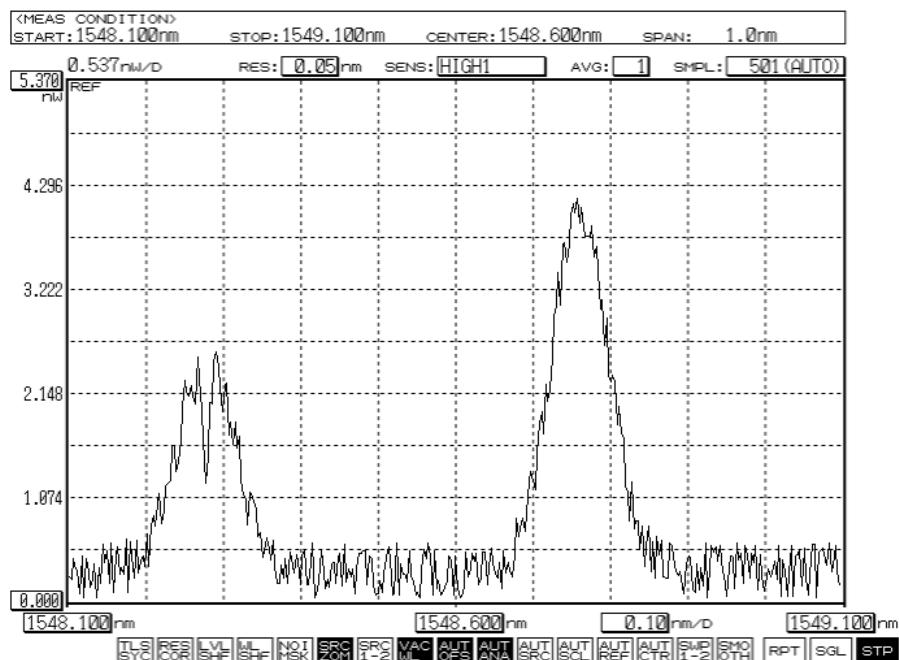


Рис. 14. Спектральная характеристика АВБС с волновой и фазовой компонентами (наведенный коэффициент преломления  $\sim 10^{-5}$ )

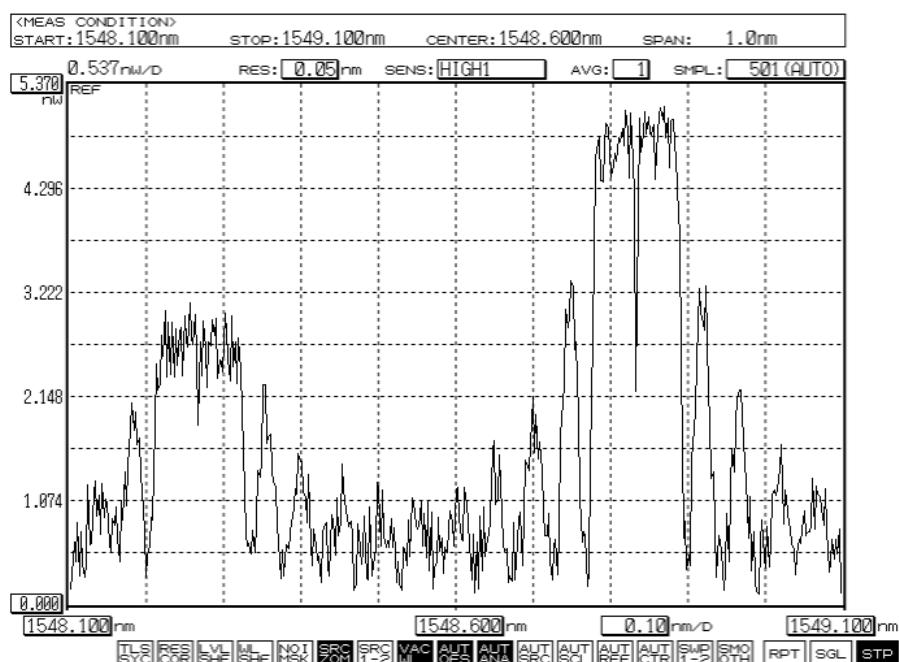


Рис. 15. Спектральная характеристика АВБС с волновой и фазовой компонентами (наведенный коэффициент преломления  $\sim 10^{-4}$ )

Анализ рис. 15 показывает, что с увеличением наведенного коэффициента преломления увеличивается амплитуда боковых лепестков, а определение разностных частот становится затруднительным, что объясняется плоскими вершинами компонент АВБС. Однако второй недостаток можно использовать в пороговых системах мониторинга, например, при контроле прохождения фронта ударной волны в ТП. А первый – может быть минимизирован при сдвиге или даже перекрытии обеих компонент. Последнее может быть реализовано изменением силы натяжения волокна при раздельной записи ВБР компонент.

Полученные результаты показывают возможность записи  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС с использованием выбранных методик записи и использовании их при построении различных комплексных волоконно-оптических датчиков.

## Заключение

1. Разработана математическая модель АВБС с волновой и фазовой компонентами с использованием методов матриц передачи и связанных мод.

2. Проведен анализ поведения спектральной характеристики АВБС с волновой и фазовой компонентами при изменении ее параметров: периода, величины наведенного показателя преломления и фазового сдвига, соотношения длин участков, между которыми записан фазовый сдвиг, длины адресной компоненты с фазовым сдвигом.

3. Проведено математическое моделирование принципа работы волоконно-оптического датчика на основе АВБС с волновой и фазовой компонентами при работе схемы на отражение. Результаты моделирования показали, что «красное» смещение центральной длины волны  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС приводит к линейному уменьшению амплитуды сигнала биений между ее адресными компонентами, по которым с учетом характеристик оптического фильтра с линейной наклонной характеристикой можно определить как положение всех адресных компонент структуры, так и их амплитуды, и, таким образом, по вычисленным адресным частотам идентифицировать волоконно-оптический датчик и его основную адресную частоту.

4. Разработан макет структурной схемы радиофотонной квазираспределенной адресной сенсорной системы контроля температуры в ТП ЭС и практические рекомендации по используемой элементной базе и вариантов установки датчика. Проведенные экспериментальные исследования на ее макете показали возможность достижения погрешности измерения температуры в  $\pm 0,01$  °C.

5. Проведено экспериментальное исследование процессов записи АВБС с волновой и фазовой компонентами с использованием комбинированного метода записи, который состоит из совокупности метода записи  $\lambda$ -ВБР с помощью интерферометра Тальбота за один период экспонирования и метода последовательной записи двух  $\lambda$ -ВБР для формирования  $\lambda/\pi$ -ВБР с помощью моторизованной подвижки за два дополнительных периода экспонирования.

Особенности разработанной и изготовленной АВБС с волновой и фазовой компонентами:

1. В отличие от ранее разработанных типов АВБС  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС не имеет явно выраженной основной адресной частоты, которая могла бы быть определена в одном из режимов – на отражение или на пропускание.

2.  $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС имеет три дополнительных адресных частоты, по любым двум из которых можно вычислить ее основную адресную частоту в режиме работы на отражение. В общем случае такая структура используется как трехкомпонентная АВБС.

3. Дополнительная адресная частота, характеризующая  $\lambda/\pi$ -ВБР имеет значение на порядок меньшее, чем для дополнительных адресных частот между указанной компонент-

ной и компонентой  $\lambda$ -ВБР. Это позволяет использовать  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС как двухкомпонентную АВБС на  $\lambda/\pi$ -ВБР с фотоприемником, у которого полоса пропускания также на порядок меньше.

4. Можно отметить, что  $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС предназначена в основном для работы на отражение. Использование окна прозрачности  $\lambda/\pi$ -ВБР, расположенного несимметрично по полосе отражения АВБС в целом, может быть использовано для построения оригинальных датчиков с режимом работы на пропускание при использовании высокого наведенного коэффициента преломления сердцевины при записи структуры в волокно.

5. Примененная технология записи относится к классическим и позволяет получить  $\lambda$ -ВБР и  $\lambda/\pi$ -ВБР с разными полосами пропускания, коэффициентами отражения, формой огибающей спектральной характеристики и с разными основной и дополнительными адресными частотами. Основной задачей развития процедур записи может явиться сужение полос отражения обеих компонент АВБС, для повышения точности проводимых измерений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.*

### Список литературы

1. Положение ПАО «Россети»: О единой технической политике в электросетевом комплексе. - Москва, 2017.
2. Zhang J. Leak detection of gathering pipeline based on sensitive designed fiber Bragg grating pressure sensing system / J. Zhang, L. Liang, K. Mawien et al. // Opticheskii Zhurnal. – 2023. – Vol. 90, No. 6. – P. 70-79.
3. Иваненко В. А. Система контроля давления и состояния трубопроводов ТЭЦ. Постановка задач / В. А. Иваненко, Е. В. Куликов // VI Научный форум "Телекоммуникации: теория и технологии" ТТТ-2023: Материалы XXI МНТК, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2023. – С. 99-100.
4. Куликов Е.В. Система для оценок износа ствола по данным измерения его деформаций с использованием адресных волоконных брэгговских решёток / Е. В. Куликов, А. Ж. Сахабутдинов, К. А. Липатников и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 1(45). – С. 78-89.
5. Трубопроводы атомной электростанции // World Data Centers URL: <http://www.wdcb.ru/mining/sprav/document/pipe/pipe.html> (дата обращения: 05.05.2025).
6. Яковлев Ю. Пластиковые трубопроводы в энергетике / Ю. Яковлев // Водоснабжение и канализация. – 2009. – № 4. – С. 45-53.
7. Исламов Р.Р. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях / Р.Р. Исламов, Р.В. Агиней, Е.В. Исупова // Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ. – 2017. – № 6. – С. 31-40.
8. Буров В.Н. Система автоматизированного мониторинга состояния надземного трубопровода на основе брэгговских волоконно-оптических датчиков / В.Н. Буров, А.В. Гречанов, А.Н. Наумов и др. // Вестник науки и образования. – 2019. – № 4-2(58). – С. 20-25.
9. Мисбахов Р. Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р. Ш. Мисбахов, В. И. Артемьев, О. Г. Морозов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 2(62). – С. 57-73. – DOI 10.25686/2306-2819.2024.2.57. – EDN: DCIMOA.
10. Мисбахов Р. Ш. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р. Ш.

- Мисбахов, Р. Ш. Мисбахов, О. Г. Морозов и др.// Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3(46). – С. 24. – EDN: ZWZEGR.
11. Baldwin C. Review of Fiber Optic Accelerometers / C. Baldwin, J. Niemczuk, J. Kiddy et al. // In Proceedings of the IMAC XXIII: A Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando, FL, USA, 31 January–3 February 2005.
  12. Guo Y. Fiber Bragg Grating Based Acceleration Sensors: A Review / Y. Guo, M. Chen, L. Xiong et al. // Sens. Rev. – 2021. Vol. 41. – P. 101–122.
  13. Li T. Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review / T. Li, J. Guo, Y. Tan, Z. Zhou // IEEE Sens. J. – 2020. – Vol. 20. – P. 12074–12087.
  14. Gangopadhyay T.K. Prospects for Fibre Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers in Fibre-Optic Vibration Sensing / T.K. Gangopadhyay // Sens. Actuators A Phys. – 2004. – Vol. 113. – P. 20–38.
  15. García Y.R. Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors / Y.R. García, J.M. Corres, J. Goicoechea // J. Sens. – 2010. – Vol. 2010. – № 1.
  16. Rao Y.-J. Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors / Y.-J. Rao, Z.-L. Ran, Y. Gong // 1st ed.; CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 9 May 2017. – P. 204.
  17. Zhu C. Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review / C. Zhu, H. Zheng, L. Ma, Z. Yao, B. Liu, J. Huang, Y. Rao // IEEE Sens. J. – 2023. – Vol. 23, № 7. – P. 6406-6426.
  18. Wang M.-C. Low-Frequency Vibration Sensor with Dual-Fiber Fabry–Perot Interferometer Using a Low-Coherence LED / M.-C. Wang, S.-Y. Chao, C.-Y. Lin et al. // Crystals. – 2022. – Vol. 12, № 8. – P. 1-11.
  19. Мамонова Т. Е. Методы диагностики линейной части нефтепроводов для обнаружения утечек / Т. Е. Мамонова // Проблемы информатики. – 2012. – № S3(17). – С. 103–112.
  20. Морозов О. Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазиаспределённых радиофотонных сенсорных системах / О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 535–543.
  21. Мисбахов Р. Ш. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах / Р. Ш. Мисбахов, А. Н. Васев, А. Ж. Сахабутдинов и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 3. – С. 101-110.
  22. Морозов О.Г. Четырехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры - новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей / О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов, И. И. Нуреев и др. // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 43-65. – EDN: RKKSCO.
  23. Куликов Е.В. Выбор конструкции и чувствительных элементов волоконно-оптического акселерометра для контроля утечек трубопровода / Е.В. Куликов, Р.Ш. Мисбахов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2024. – Т. 4, № 3. – С. 46-60.
  24. Куликов Е.В. Волоконно-оптический акселерометр для контроля утечек в трубопроводах на основе двух комбинированных адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазо-волновой компонентами. Математические модели / Е.В. Куликов, Р.Ш. Мисбахов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2024. – Т. 4, № 3. – С. 61-76.
  25. Куликов Е.В. Квазиаспределенная волоконная система контроля вибраций двигателей центробежных насосов на комбинированных адресных структурах / В.В. Егоров, П.Е. Денисенко, Р.Ш. Мисбахов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 6. – С. 137-140.

26. Куликов Е.В. Система контроля скорости снаряда на выходе ствола с использованием многоадресных волоконных брэгговских решеток / Е.В. Куликов, А.Ж. Сахабутдинов, К.А. Липатников и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 2 (46). – С. 55.
27. Куликов Е.В. Поляризационный волоконно-оптический датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора с радиофотонным адресным опросом / Е.В. Куликов, О.Г. Морозов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2022. – № 4 (56). – С. 38-50.
28. Куликов Е.В. Адресные волоконные брэгговские решетки для контроля скорости фронта ударной волны в трубопроводах / Е.В. Куликов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 42-54.

## ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURE WITH WAVE AND PHASE COMPONENTS AS A NEW TOOL OF MICROWAVE PHOTONIC TECHNOLOGIES

*Rus.Sh. Misbakhov<sup>1</sup>, E.V. Kulikov<sup>2</sup>, V.I. Artemyev<sup>1</sup>,  
G.A. Morozov<sup>1</sup>, E.V. Belov<sup>1</sup>, A.A. Silantyeva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K. Marx, 420111, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>FSBI "3rd Central Research Institute"  
of the Ministry of Defense of the Russian Federation  
10, Pogonny proezd, 107564, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article presents the methods of analysis and principles of formation of addressable fiber Bragg structures with wave and phase components as a new tool of microwave photonic technologies and formulates the tasks for creation on their basis of microwave photonic quasi-distributed addressable sensor systems for monitoring and technical diagnostics of pipelines of power plants (an example of application). The necessity of synthesis of addressable fiber Bragg structures with wave and phase components is substantiated, their mathematical model is developed, the features of the main address of the structure and its additional addresses, which are key for processing optical information in the radio range, are determined. Based on the results of addressable fiber Bragg structures with wave and phase components optomechanics analysis, microwave photonic technologies of their interrogation and the structure of a microwave photonic quasi-distributed addressable sensor system for determining the temperature of a pipeline when sensors operate in reflection mode are proposed. Practical recommendations are given for recording the studied structures in fiber.

**Keywords:** addressable fiber Bragg structure, wave component, phase component, optomechanics, microwave photonic sensor technologies, features of the structure operation on reflection, recording of the Bragg structure in the fiber, monitoring and technical diagnostics of power plant pipelines, microwave photonic quasi-distributed addressable sensor system for determining the temperature of the pipeline.

Статья представлена в редакцию 20 апреля 2025 г.