

РАДИОФОТОННЫЕ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЕ АДРЕСНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Рус. Ш. Мисбах¹, Е.В. Куликов², В.И. Артемьев¹, Г.А. Морозов¹,
Э.В. Белов¹, А.А. Силантьева¹*

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

²ФГБУ «3 Центральный научно-исследовательский институт»
Министерства обороны Российской Федерации
Российская Федерация, 107564, Москва, Погонный пр-д, 10

Аннотация. Представлены результаты разработки методов анализа и принципов построения радиофотонных квазираспределенных адресных сенсорных систем мониторинга и технического диагностирования трубопроводов электростанций с целью улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик на основе использования нового инструмента реализации радиофотонных сенсорных технологий и технологий многосенсорного мультиплексирования – адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами. При этом учитываются различия спектральных характеристик компонент последних при работе на отражение и возможности их параллельного попарного включения как в целом, так и по отдельным компонентам при работе на пропускание. Радиофотонные сенсорные технологии с использованием нового инструмента контроля основаны с одной стороны на классической регистрации изменений величин продольных и поперечных деформаций трубопровода, вызванных изменением давления и температуры в трубе, отдельными структурами, а с другой стороны – на возможности формирования интеллектуальной многосенсорной вставки в трубу в зоне опоры трубопровода, что позволяет дополнительно контролировать и ее состояние.

Ключевые слова: мониторинг и техническое диагностирование трубопроводов электростанций, радиофотонные квазираспределенные адресные сенсорные технологии и системы, адресная волоконная брэгговская структура, волновая компонента, фазовая компонента, асимметричный режим работы структуры на отражение, параллельное попарное включение структур при работе на пропускание.

Введение

В настоящее время трубопроводный транспорт, как экономичный, стабильный и надежный метод транспортировки различных ресурсов, является основным средством снабжения и соединения между собой отдельных агрегатов тепловых, атомных и других электростанций (ЭС). Однако выход трубопроводов (ТП) ЭС из строя, вызванный их старением, механическими повреждениями, коррозией, растрескиванием кольцевой сварки и т.п., не только приводит к огромным потерям электроэнергии, но и серьезно угрожает окружающей среде, а также безопасности жизни и имуществу людей. Поэтому для ЭС крайне важно разработать практичные, осуществимые и эффективные методы и системы

мониторинга и технического диагностирования структурной целостности ТП, преимущественно работающие в режиме реального времени.

Автоматизированные системы мониторинга и технического диагностирования (МТД) должны осуществлять оперативный анализ текущего технического состояния ТП, своевременное выявление возникающих дефектов и прогнозирование их развития [1]. Мониторинг должен своевременно формировать информацию о критических значениях наблюдаемых параметров. Для различных видов и типов ТП должен выбираться оптимальный перечень ключевых параметров мониторинга. Необходима разработка и внедрение достоверных методологических подходов и решений в техническом диагностировании состояния ТП по ключевым параметрам и динамике их изменения [1].

На протяжении многих лет основное внимание исследователей в отношении волоконно-оптических технологий МТД, как наиболее устойчивых к помехам в условиях работы на ЭС, было сосредоточено на разработке волоконных брэгговских решеток (ВБР) или структур (ВБС) с повышенной чувствительностью и приемлемой стоимостью систем их опроса – интеррогаторов – на разных длинах волн [2]. Для относительно статичных приложений, таких как тепловые, это не самый важный фактор. В то время как правильный динамический отклик при наличии вибраций и скачков давления, соответствующая упаковка ВБР и ВБС, а также их сетевые возможности (мультиплексирование, адресность) являются гораздо более важными проблемами. Более того, в некоторых приложениях ЭС датчики должны выдерживать чрезвычайно высокие температуры, давления и вместе с тем быть высокочувствительными к слабым акустическим или вибрационным сигналам, возникающим в случаях формирования утечек [2]. Следовательно, существует острая потребность в разработке удобных и недорогих инструментов мониторинга для оценки структурной целостности ТП на основе инновационных сквозных цифровых технологий, к которым относятся технологии фотоники и радиофотоники, а также инновационных технологий адресных ВБС (АВБС), адаптированных к ним.

Для нас важно понимание того, что тема развития систем онлайн МТД ТП является востребованной и актуальной [3-7]. Стоимость и риск внедрения – два наиболее эффективных параметра выбора той или иной методики мониторинга и технического диагностирования. Среди этих методик наиболее экономичными и глобальными для мониторинга являются методики контроля собственной частоты колебаний, а для технического диагностирования – методики применения управляемых ударных волн, особенно в зоне взаимодействия ТП с опорой. В этих случаях методики контроля изменений в ТП являются наиболее информативными, обладающими малой стоимостью реализации и малыми рисками влияния на всю трубопроводную систему в целом во время установки и эксплуатации.

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. Опоры распределяют по длине трубопроводов с обеспечением удлинения от неподвижных («мертвых») опор в сторону к подвижным опорам [8].

Таким образом, разрабатываемые радиофотонные квазираспределенные адресные сенсорные системы должны обладать как чувствительностью к статичному и динамичному давлению, так и температуре, которая может выступать как отдельный измеряемый параметр, так и как компенсационный параметр для повышения точности измерения давления.

Проблема квазираспределенного МТД и их адресной модификации была решена в Казанской школе радиофотоники КНИТУ-КАИ, которая предложила заменить ВБР на

АВБС [9-10]. Общим преимуществом АВБС является возможность их мультиплексирования по адресным радиочастотам и реализация радиофотонного опроса, что позволяет строить многосенсорные мультипараметрические сети с высокой точностью и низкой стоимостью измерений за счет замены оптоэлектронных интеррогаторов на радиофотонные.

В данной работе рассматриваются системы, построенные на основе АВБС с волновой и фазовой компонентами – $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС. Высокая вероятность получения преимуществ $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по сравнению с другими двухкомпонентными 2λ -АВБС и 2π -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 π -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 интеррогатора более дешевый узкополосный фотоприемник. Вероятность получения преимуществ $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС по сравнению с трехкомпонентными 3λ -АВБС и 3π -АВБС основывается на том, что при всех преимуществах двух последних, изготовление первых существенно проще, хотя преимущества трехкомпонентных АВБС сохраняются и в $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Цель работы – показать возможность создания и улучшения метрологических и технико-экономических характеристик радиофотонных квазираспределенных адресных систем для мониторинга и технического диагностирования трубопроводов электростанций с использованием нового инструмента реализации радиофотонных технологий и технологий многосенсорного мультиплексирования – АВБС с волновой и фазовой компонентами с учетом различия спектральных характеристик компонент последних при работе на отражение и возможности параллельного попарного включения как в целом, так и по отдельным компонентам при работе на пропускание.

Волоконно-оптические датчики будут основаны на изменении величин продольных и поперечных деформаций, вызванных соответственно:

- ускорением инерционной массы в акселерометре, установленном на трубопроводе, для мониторинга собственных колебаний ТП и вибраций;
- изменением радиальной геометрии АВБС под воздействием ударной волны и изменением поляризационных свойств распространения лазерного излучения в волокне при поперечном давлении трубы на опору для технического диагностирования.

Измерительное преобразование будет основано на регистрации параметров оптических сигналов, полученных от каждой компоненты и прошедших через окна прозрачности указанных структур в оптическом диапазоне при реализации соответственно асимметричного или параллельного попарного режимов работы сенсоров на отражение и пропускание, и на оценке их параметров по огибающей биений компонент в радиодиапазоне, что, кроме функции контроля, позволяет реализовать технологии мультиплексирования сенсоров и адресного характера измерений с их локализацией по месту установки на трубопроводе.

Далее в статье представлены результаты:

1) разработки методов анализа и принципов построения ВОД и радиофотонных квазираспределенных адресных сенсорных систем (РКАСС) на основе АВБС с волновой и фазовой компонентами (ВФК) для акселерометрического мониторинга вибраций при работе на отражение и пропускание на протяженных участках трубопроводов;

2) разработки методов анализа и принципов построения ВОД и РКАСС на основе АВБС с волновой и фазовой компонентами для технического диагностирования трубопроводов при прохождении фронта ударной волны давления на протяженных участках и в зоне его контакта с опорами путем анализа продольных и поперечных деформаций соответственно.

1. Акселерометрическая РКСС на основе АВБС с ВФК

В начале исследований была поставлена задача анализа существующих акселерометрических методов и средств, использующих ВБР, по результатам которого можно принять решение об их особенностях как инструмента контроля и особенностях их конструкций, которые могут быть использованы при переходе к АВБС и радиофотонным технологиям опроса [11-19]. Общую постановку задачи анализа можно разделить на три основные части: методы обнаружения утечек, пространственные характеристики анализа, возможность локализации точки утечки.

Остановим свой выбор на использовании лучших конструкций акселерометров на ВБР, не требующих сложного перехода к построению на их основе акселерометров с радиофотонными методами опроса и радиофотонных многосенсорных систем мониторинга. Перспективы такого выбора – замена ВБР на АВБС – кажутся простыми. Однако особое внимание следует обратить на то, что для предложенной в этой работе $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС основная адресная частота явно не выражена, т.е. не может быть определена по измерениям только на пропускание или только на отражение. Это еще раз подтверждает необходимость анализа полного спектра сигналов от одного или массива акселерометров при параллельно-попарном включении $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, что и будет рассмотрено далее в частных задачах.

Для опроса АВБС с ВФК должен быть построен адресный радиофотонный интеррогатор, существенно более дешевый по параметру массогабаритных показателей РВСиМ (размер, вес, стоимость и потребляемая мощность) в сравнении с оптоэлектронным и способный работать в режиме использования АВБС как на отражение, так и на пропускание.

Рассмотрим вопросы синтеза функциональной оптико-электронной схемы радиофотонного акселерометра, на основе двух АВБС с ВФК, включенными параллельно-попарно, но в разных плечах акселерометра и работающими на отражение, а также четырех АВБС с ВФК, включенными параллельно-попарно в каждом плече акселерометра и работающими на пропускание.

В первом случае может быть построен двухволоконный акселерометр с попарным включением двух $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС: одной в верхнем, а другой в нижнем плече (рис. 1, используются верхнее и нижнее волокна с АВБС₁ и АВБС₄).

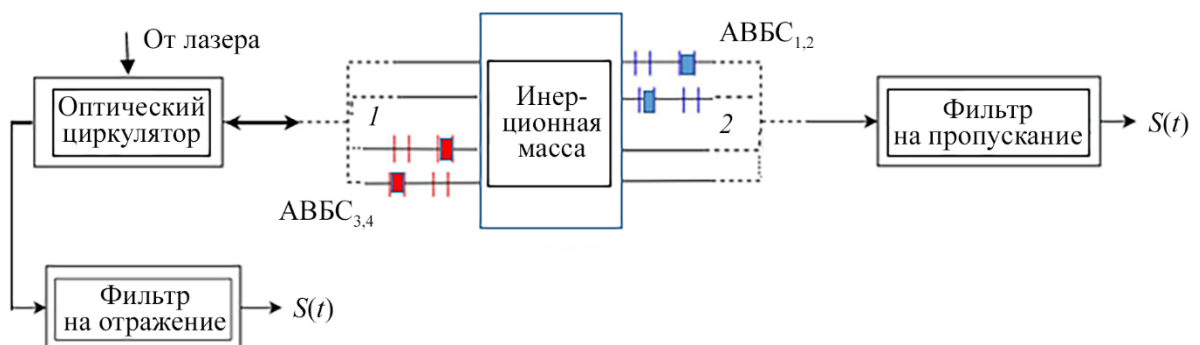


Рис.1. Комплексное решение для акселерометра на параллельно-попарно включенных $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС (1, 2 – оптические разветвители)

При этом включение осуществляется λ/π -ВБР компонентами навстречу друг друга. При работе двухволоконного акселерометра на пропускание он повторяет структуру акселерометра на λ/π -ВБР, что явно не удовлетворяет решаемой нами задаче. Тогда может быть

применено решение с параллельно-попарным включением двух $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС: двух в верхнем плече АВБС₁ и АВБС₂, а еще двух в нижнем плече АВБС₃ и АВБС₄, а сам акселерометр становится четырехволоконным (рис. 1).

В этом случае используются все четыре волокна с АВБС₁ ... АВБС₄, при этом включение осуществляется как λ/π -ВБР компонентами навстречу друг друга в верхнем и нижнем волокнах, так и λ -ВБР компонентами навстречу друг друга для верхнего и нижнего средних волокон. Обязательным условием является совпадение спектральных характеристик в каждом из плеч акселерометра, но с обратным расположением компонент. Наличие в структуре $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС компоненты с фазовым π -сдвигом предположительно позволит повысить точность измерения при работе на пропускание, которая не достижима при достаточно широкой полосе отражения ВБР-компонент (работа на отражение).

На рис. 2 представлен эскиз конструкции двухволоконного акселерометра (а) и иллюстративные амплитудно-частотные постановки задач его работы в нулевой рабочей точке (б) с треугольным ОФНЛХ и в режиме измерений на линейном участке (в) с линейным ОФНЛХ (оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой – фильтр на пропускание или отражение на рис. 1).

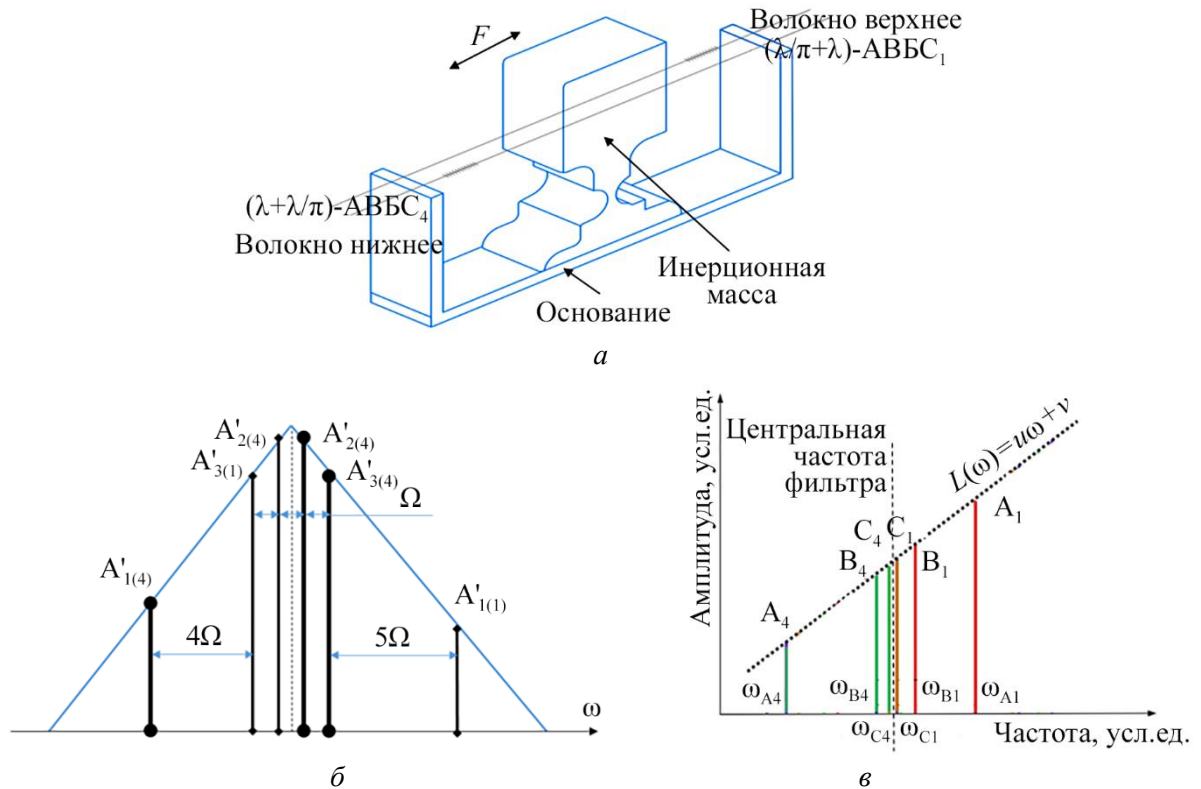


Рис. 2. Эскиз конструкции двухволоконного акселерометра (а) и иллюстративные амплитудно-частотные постановки задач его работы в нулевой рабочей точке (б) и на линейном участке (в)

Была разработана математическая модель процесса измерения ускорения в области нулевой рабочей точки акселерометра и с локализацией АВБС с ВФК, работающими на отражение, соответственно на склонах ОФНЛХ треугольной и линейной форм.

На основе анализа параметров огибающих биений компонент, указанных на рис.2, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\lambda/\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\lambda/\pi\text{-ВБР}(4)}$ для случая линейных измерений $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,4} акселерометра без пересечения нулевой рабочей точки. Для контроля выбрана частота Ω :

$$P(t) = F(t)F^*(t) \sim \Re \left\{ A_{2(1)}^2 + A_{3(1)}^2 + A_{3(4)}^2 + A_{2(4)}^2 + \left\{ \left[A_{2(1)}^2 A_{3(1)}^2 + A_{3(1)}^2 A_{3(4)}^2 + A_{3(4)}^2 A_{2(4)}^2 \right] \cos \Omega t + \left[A_{2(1)}^2 A_{3(4)}^2 + A_{3(1)}^2 A_{2(4)}^2 \right] \cos 2\Omega t + \left[A_{2(1)}^2 A_{2(4)}^2 \right] \cos 3\Omega t \right\} \right\}. \quad (1)$$

Факт прохождения нулевой рабочей точки сопровождается наличием сигнала огибающей биений на частоте, равной разностной частоте λ/π -ВБР компонент Ω , на выходе соответствующего микроволнового фильтра РФИ. Выходные сигналы других микроволновых фильтров будут равны нулю. Равенство амплитуд λ/π -ВБР компонент и симметричность треугольной ВБР приведут к идентичным результатам.

Для определения местоположения каждой $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС на линейном участке измерений необходимо использовать их адресную компоненту по λ -ВБР компонентам, расположенным асимметрично. Альтернативно в этом случае можно использовать ОФНЛХ и широкополосный фотоприемник или делать λ/π -ВБР компоненты с разными адресными частотами. Смещение центральной частоты каждой $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,4} с одной стороны ведет к изменению взаимного отношения амплитуд их адресных компонент, а с другой – влечет за собой изменение параметров огибающей биений на адресных частотах $(\omega_{C1,4} - \omega_{A1,4})$, $(\omega_{B1,4} - \omega_{A1,4})$ и $(\omega_{C1,4} - \omega_{B1,4})$.

Выражение для выходного тока фотоприемника, пропорциональное мощности широкополосного лазерного диода P и коэффициента преобразования фотоприемника $\Re$, является суммой элементов биений всех компонент. Без учета постоянной составляющей можно записать:

$$I(t) \sim \left\{ \begin{aligned} &A_1 A_4 \cos[(\omega_{A1} - \omega_{A4})t] + A_1 B_4 \cos[(\omega_{A1} - \omega_{B4})t] + A_1 C_4 \cos[(\omega_{A1} - \omega_{C4})t] + \\ &+ B_1 A_4 \cos[(\omega_{B1} - \omega_{A4})t] + B_1 B_4 \cos[(\omega_{B1} - \omega_{B4})t] + B_1 C_4 \cos[(\omega_{B1} - \omega_{C4})t] + \\ &+ C_1 A_4 \cos[(\omega_{C1} - \omega_{A4})t] + C_1 B_4 \cos[(\omega_{C1} - \omega_{B4})t] + C_1 C_4 \cos[(\omega_{C1} - \omega_{C4})t] \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Для фильтрации введем программный фильтр и выделим «нулевую» частоту (постоянный уровень сигнала), множество адресных частот $\Omega_{21;1,4}$, $\Omega_{23;1,4}$ и множество сумм адресных частот $\Omega_{31;1,4} = \Omega_{21;1,4} + \Omega_{23;1,4}$:

$$\{\Omega_{f;1,4}\} = \{0_{1,4}\} \cup \{\Omega_{21;1,4}\} \cup \{\Omega_{23;1,4}\} \cup \{\Omega_{21;1,4} + \Omega_{23;1,4}\}. \quad (3)$$

Отфильтровав сигнал (2) на частотах (3), получим переопределенную систему из десяти уравнений для нахождения девяти неизвестных, указанных в выражении (2). Решение переопределенной системы уравнений можно проводить методом наименьших квадратов.

При этом отметим, что обе структуры не пересекаются. Возможное пересечение определяется только при рассмотрении квазираспределенного включения нескольких акселерометров по протяженным участкам ТП. Подобная задача для многосенсорных трехкомпонентных структур решена в других работах Казанской школы радиофотоники [20-22], поэтому подробно рассматривать ее не будем.

Далее была разработана математическая модель процесса определения области нулевой рабочей точки акселерометра и с локализацией АВБС с ВФК, работающими на пропускание, соответственно на склонах ОФНЛХ.

Для анализа структуры и описания принципов работы радиотонного четырехволнового акселерометра воспользуемся концепцией, показанной на рис. 1. На рис. 3 представлен эскиз конструкции четырехволоконного акселерометра (а) и иллюстративные амплитудно-частотные постановки задач его работы в нулевой рабочей точке (б) и в режиме измерений на линейном участке (в) с линейным ОФНЛХ, работающими на пропускание. Для

анализа используются излучения с выхода четырех окон прозрачности λ/π -ВБР компонент. Амплитуды $T_{R1,2}$ и $T_{R3,4}$ адресных составляющих изменяются в соответствии с их смещением по оси частот, при этом $T'_{R1,2-} \neq T'_{R1,2+} \neq T'_{R3,4-} \neq T'_{R3,4+}$.

На выходе фотоприемника оцифруем огибающую биений полученных сигналов по показаниям двух программных фильтров на адресных частотах биений $\Delta\omega_{AO1,2}$ и $\Delta\omega_{AO3,4}$ и определим положение $\omega_{B1,2} \neq \omega_{B3,4}$. Для этого введем коэффициент модуляции для огибающей биений адресных составляющих в виде:

$$M'_{B1,2} = \frac{2T'_{R1,2-} - T'_{R1,2+}}{T'_{R1,2-} + T'_{R1,2+}}; \quad M'_{B3,4} = \frac{2T'_{R3,4-} - T'_{R3,4+}}{T'_{R3,4-} + T'_{R3,4+}}. \quad (4)$$

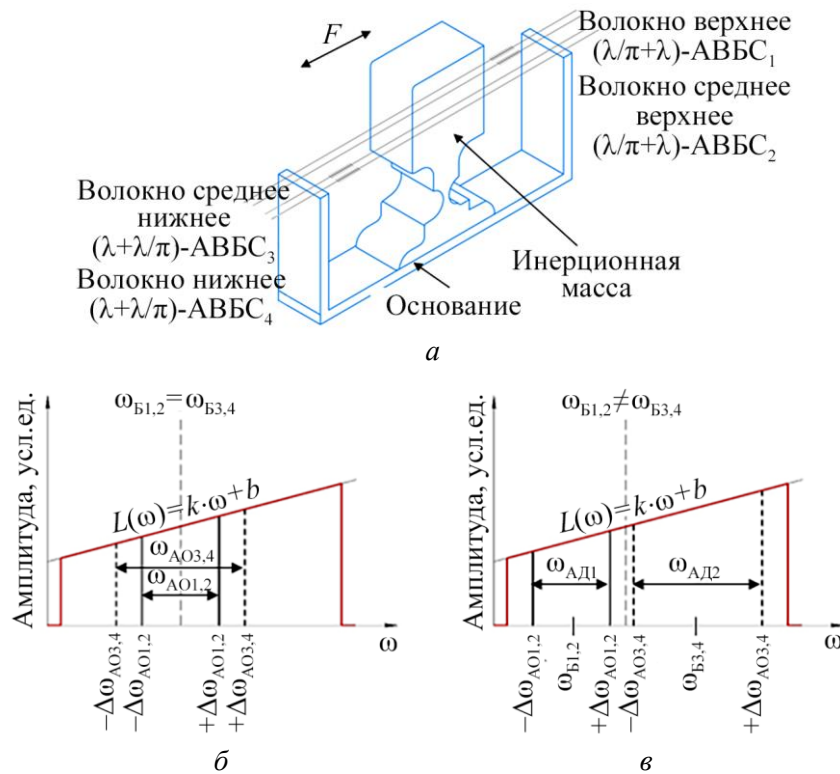


Рис. 3. Эскиз конструкции четырехволоконного акселерометра (а) и иллюстративные амплитудно-частотные постановки задач его работы в нулевой рабочей точке (б) и на линейном участке (в)

В итоге получим разность центральных брегговских частот как функцию собственных колебаний ТП или вибраций, выраженных через силу, приложенную к инерционной массе:

$$\omega_{B1,2} - \omega_{B3,4} = \Phi(F) = M_{B1,2} / M_{B3,4}. \quad (5)$$

При этом решение неравенств $M_{B1,2} < M_{B3,4}$ или $M_{B1,2} > M_{B3,4}$ дает возможность определить направление приложения силы.

Далее представлена расширенная структурная схема экспериментального стенда для исследования акселерометрической РКСС мониторинга собственных колебаний ТП и результаты имитационных исследований. Сформулированы рекомендации для построения интеллектуальной вставки для квазираспределенной радиофотонной системы по длине ТП акселерометров при их подземной или надземной установке в зоне опор. На рис. 4 показана обобщенная структурная схема РКСС мониторинга собственных колебаний трубопровода

на протяженных участках ТП с установкой входного и выходного акселерометров в зоне опоры ТП в структуре интеллектуальной вставки.

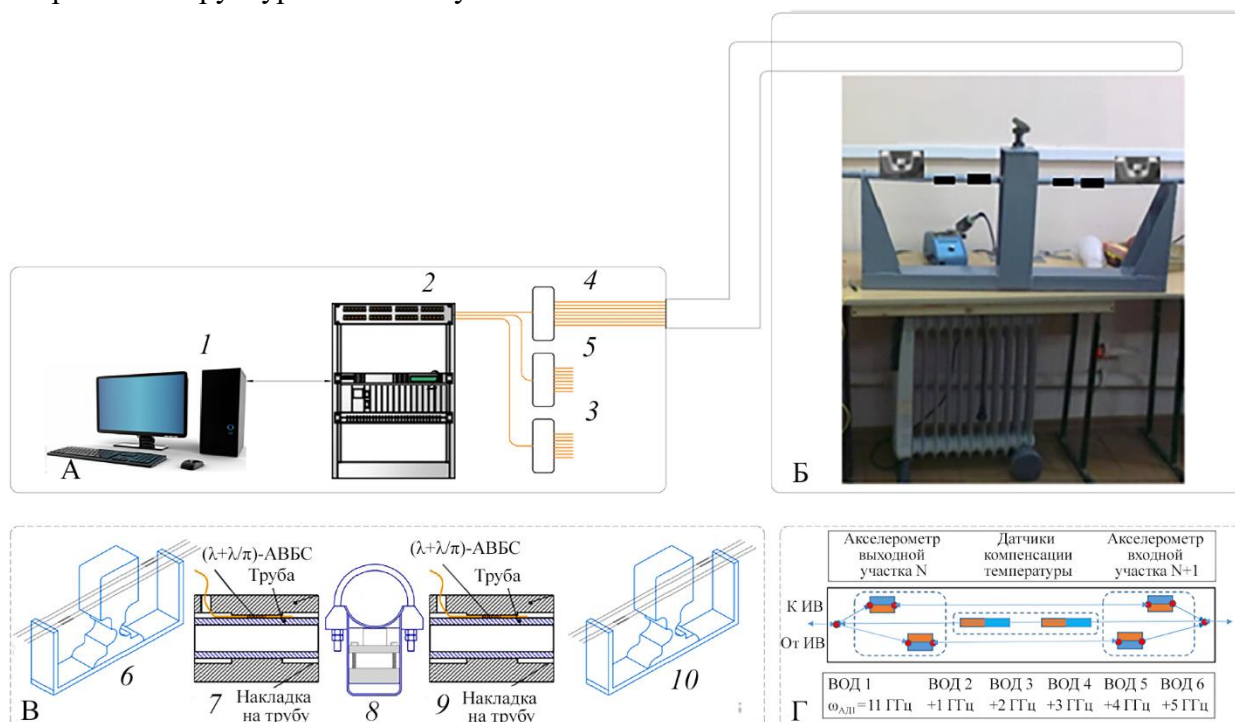


Рис. 4. Обобщенная структурная схема РКАСС контроля собственных колебаний ТП для протяженных участков и универсальный экспериментальный стенд с интеллектуальной муфтой

Схема подразделяется на четыре блока, где блок «А» – диспетчерская, а блок «Б» – общий вид стенда с установленными акселерометрами и внедренными ВОД температуры на основе $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС для компенсации их показаний (отмечено черным цветом).

Блок «Г» – иллюстративная схема записи датчиков в волокне. Оптическое волокно содержит параллельно-попарно записанные $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС для организации работы на отражение ВОД1 и ВОД2 для выходного акселерометра участка N , ВОД5 и ВОД6 входного участка $N + 1$, условно показаны два датчика температуры ВОД3 и ВОД4. Как отмечалось, поступление лазерного излучения в волокна осуществляется по верхнему и нижнему волокнам, но может быть использована и универсальная схема с распределением света через среднее волокно. Таких комплексов волокон и датчиков по площади трубопровода может быть установлено несколько.

После калибровки датчики были установлены на универсальном стенде, изготовленном в НИИ ПРЭФЖС (блок «Б» на рис. 4). При проведении имитационных испытаний блок «Б» подключался к системе теплоснабжения НИИ ПРЭФЖС. В качестве источника утечки использовалась система травления воздуха из алюминиевого радиатора. Дополнительно с помощью имитатора вибраций на трубу стенда подавались колебания различной интенсивности на различных частотах. Регистрировалась работа стенда в различных режимах. В качестве примера на рис. 5 приведены графики для режима высокоинтенсивных утечек. Данные на рис. 5, а, б показывают, что анализ оценки уровня утечки также может быть реализован по интенсивности амплитуд характерных особенностей спектра записанного сигнала с акселерометра и появлению в спектре новых характерных особенностей, появляющихся в силу увеличения диаметра слива в клапане алюминиевого радиатора. При этом часть гармоник сигнала при закрытом радиаторе пропадает, что объясняется высокой интенсивностью утечки и изменением гидродинамики в системе. Общий вывод, который может быть сделан, заключается в том, что для контроля утечек необходимо включить в реализацию МТД ТП ЭС слой интеллектуальных систем.

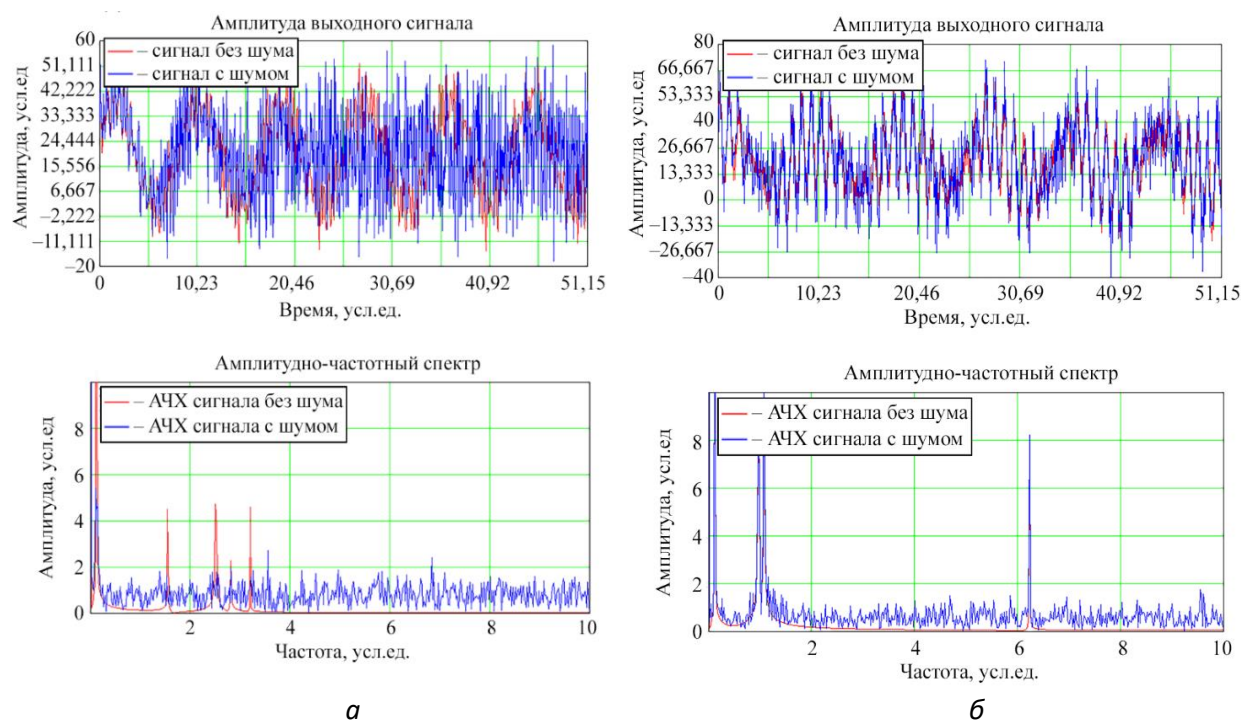


Рис. 5. Выходной сигнал акселерометра на двух волокнах (2-й эксперимент), записанный при закрытом радиаторе и с утечкой

Таким образом, в данном разделе статьи кратко представлены результаты разработанной обобщенной структурной схемы акселерометрической РКСС мониторинга собственных колебаний трубопровода с формированием основных сенсорных элементов в интеллектуальной вставке, установленной в зоне его опор [23-25]. Описано функциональное назначение блоков и представлены практические рекомендации для их реализации. Указанная структурная схема реализована на базе универсального стенда, созданного в НИИ ПРЕФЖС КНИТУ-КАИ.

2. РКСС на основе АВБС с ВФК для определения параметров фронта ударной волны

Анализ основных особенностей процесса распространения фронта ударной волны (ФУВ) различной интенсивности по трубопроводу по методу Н.Е. Жуковского позволил разработать требования и варианты конструкций, которые необходимо использовать для построения ВОД контроля давления на базе $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС и РКСС на их основе.

На рис. 6 приведена структурная схема РКСС контроля параметров ФУВ, включающая в себя внешний модуль и натрубную часть волокна с шестью группами сенсоров на двухкомпонентных АВБС с ВФК. Пары сенсоров разделены на три группы на входе и выходе по месту их расположения на различных направляющих ТП с углом 120° и различными базами измерений L_1 (для датчиков $D_{1.1}$ - $D_{1.2}$), L_2 (для датчиков $D_{2.1}$ - $D_{2.2}$) и L_3 (для датчиков $D_{3.1}$ - $D_{3.2}$) [26].

Известно, что измерения на различных базах позволяют повысить итоговую точность определения параметров ФУВ, учитывая возможные разные скорости потоков жидкости в ТП и необходимость использования дополнительных опытно-теоретических коэффициентов его распространения для финального вычисления скорости, зависящих от ресурсов ТП на поддержание давления. Лазерный источник ЛИ, используемый в нашей системе, должен иметь ширину спектра, равную 2-3 нм, учитывая сдвиг от ФУВ при полном гидроударе и хождения по температуре.

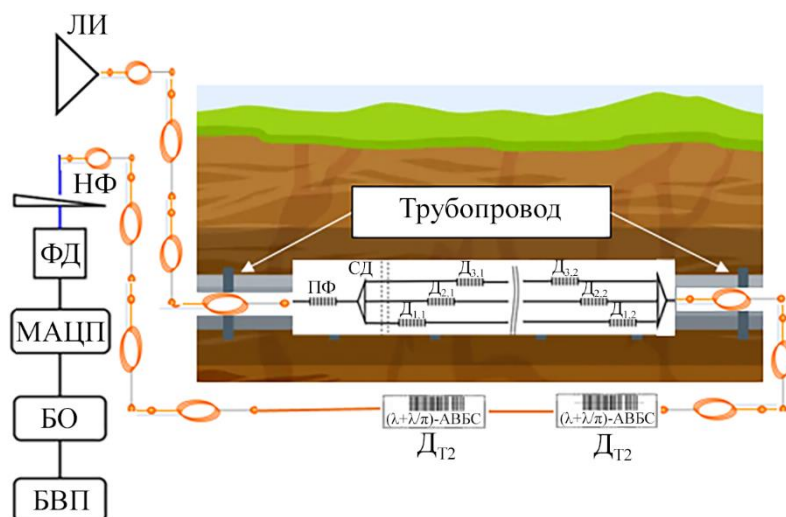


Рис. 6. Структурная схема РКСС контроля параметров ФУВ: $D_{1.1} \dots D_{3.2}$ – датчики давления; D_{T1}, D_{T2} – датчики температуры (положение всех датчиков относительно трубопровода показано условно); ЛИ – лазерный излучатель; ПФ – полосовой фильтр; НФ – ВБР-фильтр с наклонной линейной спектральной характеристикой; ФД – фотодетектор; МАЦП – многоканальное АЦП; БО – блок обработки; БВП – блок вычислений и преобразований

Широкополосное излучение от ЛИ, проходя через циркулятор, поступает в оптическое волокно, где располагаются три группы двухкомпонентных АВБС с ВФК (первые на одном, вторые на другом конце базы измерений) на его входе и выходе по длине ТП. НФ в схеме исключается. Первая $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС пара первой входной группы включена встречно λ/π -ВБР компонентами (красный цвет), а вторая пара первой выходной группы – λ -ВБР компонентами (зеленый цвет), как показано на рис. 7.

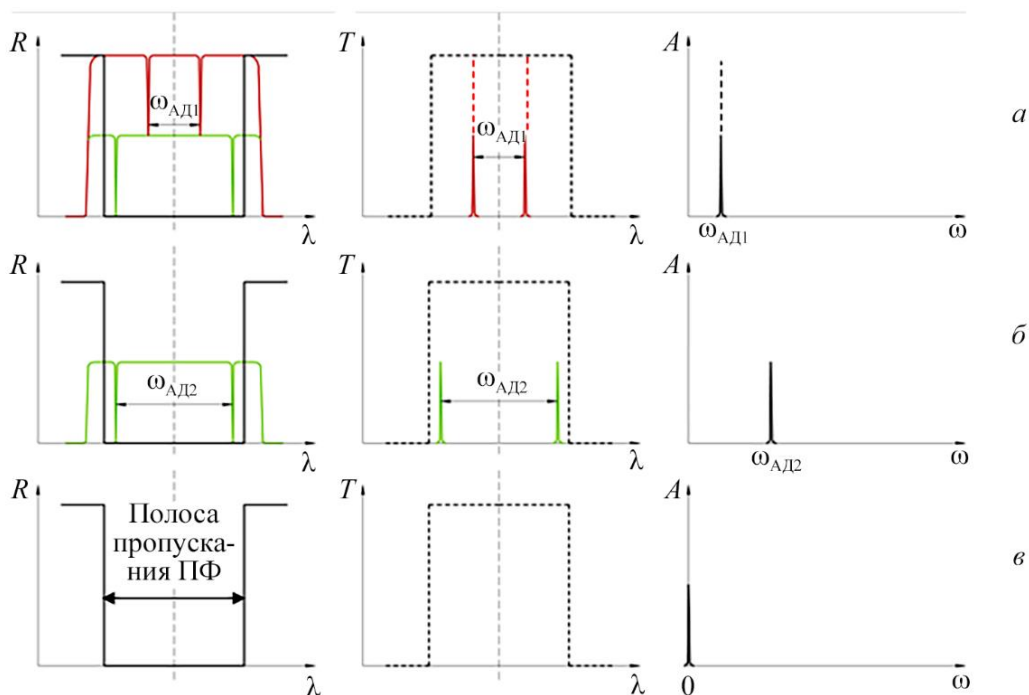


Рис. 7. Принцип измерения скорости распространения ФУВ: до прихода ФУВ (а); при приходе ФУВ на входную группу (б); при приходе ФУВ на выходную группу (в)

Коэффициент отражения АВБС в группах должен отличаться, например, в два раза. Центральные брэгговские длины волн сенсоров в группах одинаковы. В нормальном состоянии при давлении P_0 и температуре T_0 ТП на выходе входной группы $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС формируется двухкомпонентное излучение с разностной частотой $\omega_{\text{АД1}}$ (рис. 7, а), которое проходит на вход ФД и регистрируется. При приходе на входную группу ФУВ первая пара $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС сдвигается за пределы полосы пропускания ПФ и на выходе выходной группы $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС формируется двухкомпонентное излучение с разностной частотой $\omega_{\text{АД2}}$ (рис. 7, б), которое проходит на вход ФД и регистрируется. При приходе на выходную группу ФУВ вторая пара $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС также сдвигается за пределы полосы пропускания ПФ и на выходе выходной группы $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС формируется излучение ЛИ в полосе пропускания ПФ (рис. 7, в), которое проходит на вход ФД и регистрируется как постоянная составляющая соответствующая мощности ЛИ. Разница во времени между ситуациями появления на выходе фотоприемника $\omega_{\text{АД2}}$ и постоянной составляющей, а также известная межсенсорная база установки групп датчиков позволяют определить скорость распространения ФУВ. При наличии разностных частот $\omega_{\text{АД1}}$ и $\omega_{\text{АД2}}$, лежащих в диапазоне частот единиц и десятков ГГц, погрешность и время определения частоты составляет около 1 и 10 периодов, что по времени будет равно единицам и десяткам пс, а для скорости ФУВ в 1400 м/с значительно меньше, чем заданная требованием погрешность измерения.

В случае частичного гидроудара падает величина $\Delta P_{\text{уд}}$ и возрастает величина волны отрицательного давления (NPW). В этом случае при постоянной полосе пропускания ПФ (рис. 7) может сложиться ситуация, когда одна группа датчиков находится в области $\Delta P_{\text{уд}}$, а вторая в области NPW. Анализ сенсорной ситуации показывает ее полное совпадение с постановкой задачи акселерометра в разд. 1 (рис. 3). Поэтому ее не будем рассматривать подробно. Алгоритм измерения скорости ФУВ определяется фиксацией минимальных и максимальных разностных частот для спектральных положений групп АВБС.

Далее проанализируем вопросы построения датчиков поляризационного типа поперечной нагрузки для построения ВОД контроля ФУВ среднего уровня интенсивности. Рассмотрены основные конструктивные особенности, необходимые требования к диапазону измерений и их точности, а также оценена возможность построения ВОД аксиальных сил на базе одной или двух ВБР, одна – для компенсации температуры. Особенности построения ВОД поперечной нагрузки требуют их создания на базе ВБР или ВБР с фазовым π -сдвигом, что хорошо согласуется со структурой $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, применение которых было рассмотрено для однокомпонентного воздействия трубы.

Основные параметры для моделирования: период решетки ВБР – 519 нм; длина ВБР L – 10 мм; эффективное преломление без двулучепреломления – 1,46; значение двулучепреломления варьируется от 0 до $1,5 \times 10^{-5}$ с шагом $0,5 \times 10^{-5}$. Используемые параметры $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$. Получена зависимость (рис. 8, а), имеющая линейный характер, показывающий возможность применения датчиков на основе λ -ВБР компоненты $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в области контроля деформации ТП при режиме работы схемы на отражение в силу формирования в ней окна прозрачности, полоса пропускания которого будет расширяться с увеличением поперечной нагрузки. Адресность волоконно-оптического датчика при этом сохраняется. Полученная максимальная абсолютная погрешность измерений составила $\pm 0,5$ МГц и была обусловлена случайными осцилляциями поперечной силы на измерительном стенде. При использовании фитинга крутизна характеристики составляет 2,5 МГц/Н. Сравним данную характеристику с характеристикой для λ/π -ВБР компоненты $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в области контроля деформации ТП при режиме работы схемы на пропускание в силу формирования в ней сплиттированного окна прозрачности, полоса пропускания между двумя компонентами которого будет расширяться с увеличением поперечной нагрузки. При этом адресность волоконно-оптического датчика сохраняется.

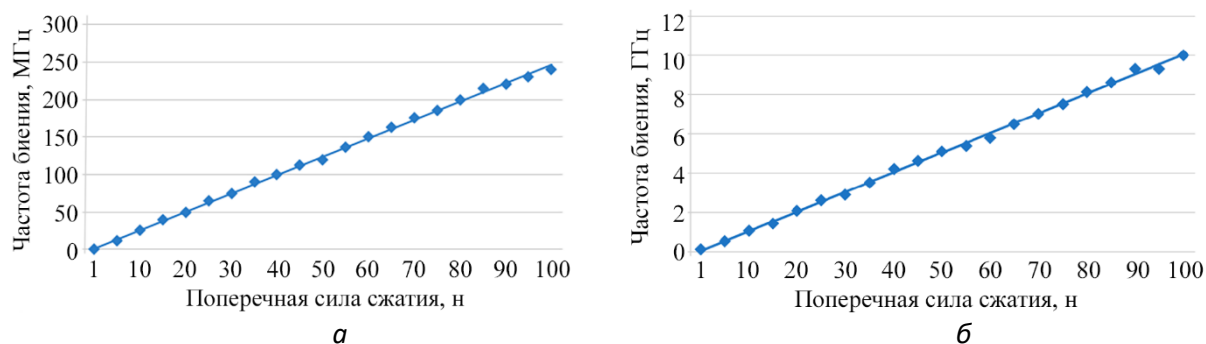


Рис. 8. Зависимость между величиной поперечной нагрузки и частотой сигнала биений на фотоприемнике на основе λ -ВБР компоненты (а), работающей на отражение, и λ/π -ВБР компоненты (б), работающей на пропускание (♦ – измеренные результаты; — — — линейная (линейный фитинг))

На рис. 8, б представлена зависимость между величиной поперечной нагрузки и частотой сигнала биений на фотоприемнике при работе схемы на пропускание. Полученная зависимость имеет линейный характер, показывающий возможность применения датчиков на основе $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС в области контроля деформации ТП при режиме работы схемы на пропускание. При этом сохраняется адресность волоконно-оптического датчика. Полученная максимальная абсолютная погрешность измерений составила $\pm 0,3$ ГГц и была обусловлена случайными осцилляциями аксиальной силы на измерительном стенде. При использовании фитинга крутизна характеристики составляет 0,1 ГГц/Н. Больший разнос частот можно получить, если использовать специальное сохраняющее поляризацию волокно, чувствительность которого в пределе составляет 0,96 ГГц/Н. Алгоритм измерения скорости ФУВ определяется фиксацией максимальных и минимальных частот сплиттирования окна прозрачности λ/π -ВБР.

На рис. 9 представлена расширенная структурная схема экспериментального стенда для исследования РКАСС технического диагностирования ТП и скорости распространения ФУВ. Сформулированы рекомендации для построения интеллектуальной вставки с устройствами измерения параметров фронта ударной волны для квазираспределенной радиофотонной системы по длине ТП при их подземной или надземной установке в зоне опор.

Блок «А» – иллюстративная схема крепления датчиков продольной деформации (6-8, 10-12), между ними установлена типовая опора ТП, в теле которой размещен датчик поперечной деформации 9. В структуре датчика содержится нагревательный элемент для исследования процессов компенсации температуры. Схема датчика поперечной деформации показана отдельно на рис. 10.

Блок «Б» – иллюстративная схема записи датчиков в волокне. Оптическое волокно содержит параллельно-попарно записанные группы $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС для организации работы на пороговое пропускание ВОД6-8 и ВОД10-12. Их соединение осуществляется согласно топологии параллельная шина с использованием желтых волокон 13, 14. Для датчиков поперечной деформации на λ/π -ВБР компонентах, установленных на каждой опоре, используется также параллельная шина по синим волокнам 13, 14. Для второй половины этих датчиков на λ -ВБР компонентах, работающих на отражение и служащих для компенсации температуре, используется синее волокно 13. Таких комплексов волокон и датчиков по площади трубопровода может быть установлено несколько. λ/π -ВБР компонента, работающая на пропускание, и λ -ВБР компонента, работающая на отражение, были нагружены двумя основаниями (рис. 10). Верхнее и нижнее основания были встроены в кронштейн-держатель опоры и резьбового калиброванного ворота. Каждая компонента воспринимала половину общей силы, распределенной по пластинам длиной 40 мм.

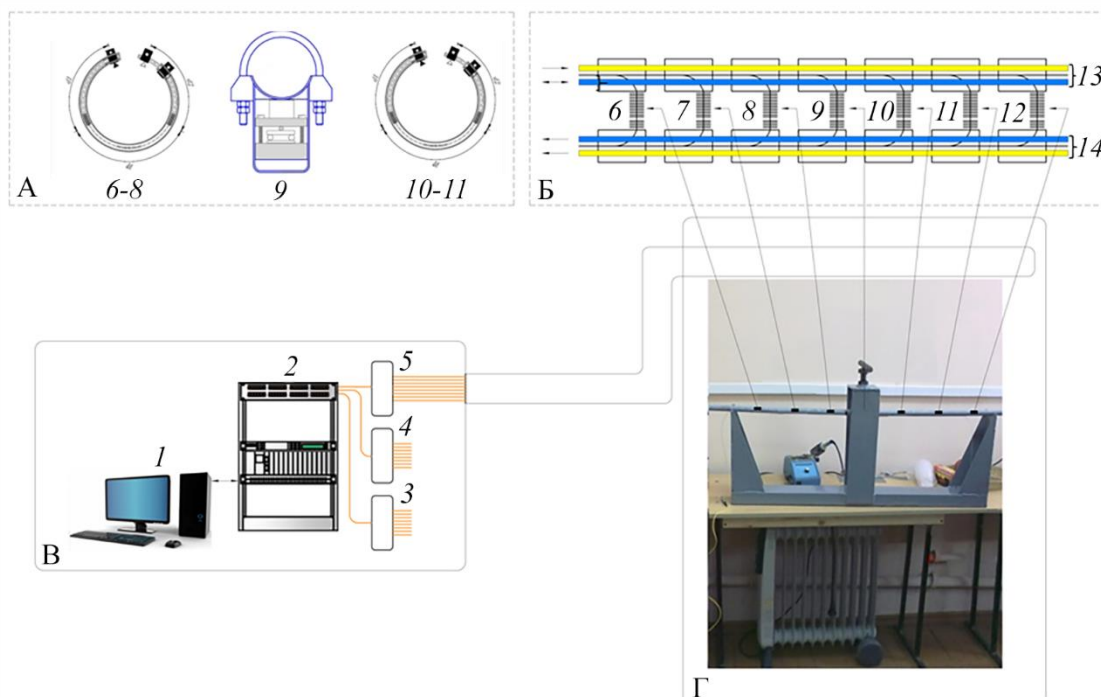


Рис. 9. Обобщенная структурная схема РКСС технического диагностирования ТП по методу определения скорости ФУВ, при продольных $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС или поперечных деформациях ее компоненты λ/π -ВБР

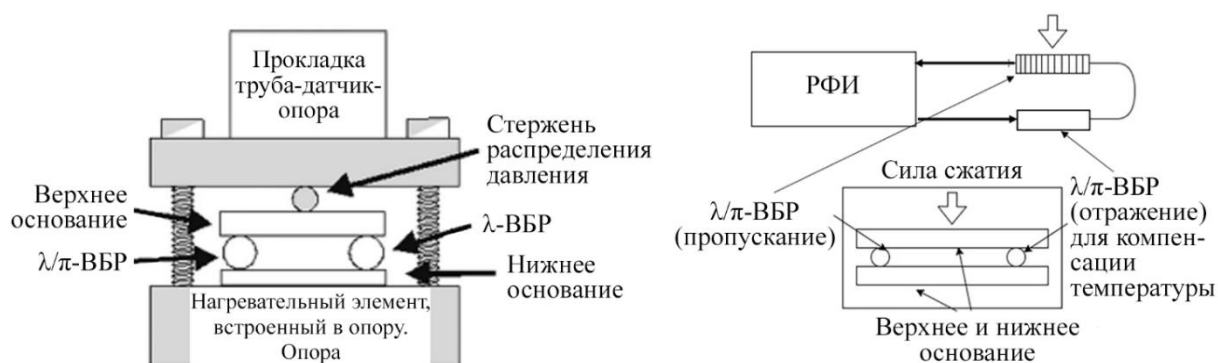


Рис. 10. Датчик поперечной нагрузки с компенсацией температуры

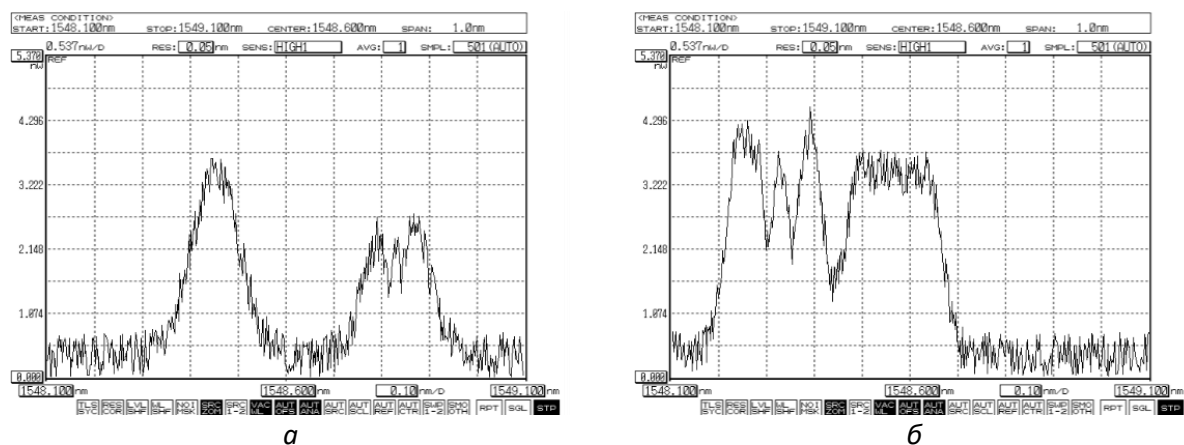


Рис. 11. Сплитирование частот для λ/π -ВБР компоненты $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС, записанной с наведенным показателем преломления волокна: $\sim 10^{-5}$ (а) и $\sim 10^{-4}$ (б)

Как видно из рис. 8, чувствительность для λ/π -ВБР компоненты в 20-40 раз превышает чувствительность для λ -ВБР компоненты. Полученное сплиттирование частот для λ/π -ВБР компоненты, зарегистрированное на стенде, представлено на рис. 11, а для наведенного показателя преломления волокна $\sim 10^{-5}$, а для наведенного показателя преломления волокна $\sim 10^{-4}$ на рис. 11, б. Таким образом, предлагается λ/π -ВБР компоненту, работающую на пропускание, использовать для контроля давления в системе «опора- $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС-ТП». Учитывая, что температура по всей длине $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС одинакова, а используемые материалы термомеханически изотропны, изменение температуры не должно вызывать изменений двойного лучепреломления. λ -ВБР компонента используется для компенсации температуры.

Таким образом, во втором разделе статьи кратко представлены результаты разработки обобщенной структурной схемы РКСС технического диагностирования трубопровода по скорости ФУВ с формированием основных сенсорных элементов в интеллектуальной вставке [27-28], установленной в зоне его опор. Описано функциональное назначение блоков и представлены практические рекомендации для их реализации. Указанная структурная схема реализована на базе универсального стенда, созданного в НИИ ПРЭФС КНИТУ-КАИ.

Заключение

1. Разработана математическая модель и структура РКСС мониторинга, позволяющие описать и реализовать процесс контроля собственных частот колебаний и вибраций в трубопроводах с помощью объединенных в сеть радиофотонных волоконно-оптических одноосевых акселерометров, отличающихся от ранее разработанных применением параллельно попарно записанных в двух или четырех волокнах АВБС с ВФК, работающих в режимах работы на отражение и пропускание, что позволило снизить погрешность преобразования продольных деформаций в сенсорах до $\pm 0,01$ пм, упростить и удешевить процесс обработки полученной с сетевых акселерометров информации.

2. Разработана математическая модель и структура РКСС технического диагностирования, позволяющие описать и реализовать процесс технического диагностирования трубопроводов по измерению скорости движения ФУВ на протяженных участках и в зоне опор трубопроводов с помощью объединенных в сеть радиофотонных волоконно-оптических датчиков продольной и поперечной нагрузок, отличающихся от ранее разработанных применением параллельно попарно записанных АВБС с ВФК, установленных в начале и конце базовой зоны измерения, и в зоне опор, работающих в режимах работы порогового пропускания и сплиттирования окна прозрачности λ/π -ВБР компоненты соответственно, что позволило снизить погрешность преобразования продольных и поперечных деформаций в сенсорах, приведенных к силе, до $\pm 0,01$ Н, упростить и удешевить процесс обработки, полученной с сетевых измерителей давления, вызванного ФУВ информации и использовать λ -ВБР компоненты в зоне опор для компенсации температуры.

3. Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи улучшение метрологических и технико-экономических характеристик РКСС для мониторинга и технического диагностирования трубопроводов электростанций с использованием нового инструмента реализации радиофотонных сенсорных технологий и технологий многосенсорного мультиплексирования – адресных волоконных брэгговских структур с волновой и фазовой компонентами с учетом различия спектральных характеристик компонент последних при работе на отражение и возможности параллельного попарного включения как в целом, так и по отдельным компонентам при работе на пропускание.

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. // Opticheski 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. Агинеи, 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 брегговских 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 брегговские 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: DCIMOА.
10. Мисбахов Р. Ш. Волоконные брегговские 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 квазираспределённых 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: RKXSCO.
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. Квазираспределенная 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.

MICROWAVE PHOTONIC QUASIDISTRIBUTED ADDRESSABLE SENSOR SYSTEMS FOR MONITORING AND TECHNICAL DIAGNOSTICS OF POWER STATION PIPELINES

*Rus.Sh. Misbakhov¹, E.V. Kulikov², V.I. Artemyev¹,
G.A. Morozov¹, E.V. Belov¹, A.A. Silantyeva¹*

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

²FSBI "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 results of the development of methods for analyzing and principles for constructing microwave photonic quasidistributed addressable sensor systems for monitoring and technical diagnostics of power plant pipelines in order to improve their metrological and technical-economic characteristics using a new tool for implementing microwave photonic sensor technologies and multi-sensor multiplexing technologies – addressable fiber Bragg structures with wave and phase components. At the same time, the differences in the spectral characteristics of the components of the latter are taken into account when working on reflection and the possibility of their parallel paired connection both as a whole and by individual components when working on transmission. Microwave photonic sensor technologies using a new control tool are based, on the one hand, on the classical registration by individual structures the changes in the values of longitudinal and transverse deformations of the pipeline caused by changes in pressure and temperature in the pipe, and on the other hand, on the possibility of forming an intelligent multi-sensor insert into the pipe in the pipeline support zone, which allows for additional monitoring of latter condition.

Keywords: monitoring and technical diagnostics of power plant pipelines, microwave photonic quasi-distributed addressable sensor technologies and systems, addressable fiber Bragg structure, wave component, phase component, asymmetric mode of structure operation in reflection, parallel pairwise connection of structures in transmission.

Статья представлена в редакцию 20 мая 2025 г.