

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ ДВУХ КОМБИНИРОВАННЫХ АДРЕСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР ВОЛНОВОЙ И ФАЗО-ВОЛНОВОЙ КОМПОНЕНТАМИ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Рус.Ш. Мисбахов¹, Е.В. Куликов²

¹ ООО "ТатАИСнефть"

Российская Федерация, 423458, г. Альметьевск, ул. Ризы Фахретдина, д. 62

²ФГБУ «3-й Центральный научно-исследовательский институт»

Министерства обороны Российской Федерации

Российская Федерация, 107564, г. Москва, Погонный проезд, д.10

Аннотация. Обнаружение утечек в трубопроводах (ТП) по-прежнему остается важной проблемой, особенно для развития интеллектуальной энергетики. Различные методы неразрушающего контроля для обнаружения утечек ТП, активно развиваются с конца прошлого века. Тем не менее, потребности в исследованиях и технологические проблемы все еще остаются, особенно на стадии их внедрения в практику тепловых и атомных электростанций. Большой интерес был проявлен исследователями к вибрационному методу обнаружения утечек. Сигнал собственной частоты колебаний трубы контролируется с помощью акселерометра, параметры которого меняются при появлении утечек. В последнее время такие акселерометры строятся на основе волоконно-оптических технологий с использованием одной или нескольких волоконных брэгговских решеток (ВБР) с хорошо известными преимуществами и недостатками. Последние связаны в основном с необходимостью применения дорогостоящего оптического спектрального устройства для их опроса – интеррогатора. Намечившийся путь к устранению этого недостатка – переход к бюджетным радиотонным интеррогаторам, работающим в области радиочастот, и адаптированных к ним чувствительным элементам – адресным волоконным брэгговским структурам (АВБС). В простейшем случае АВБС это две ВБР, разнесенные спектрально на уникальную и неизменяющуюся при любых условиях частоту, также лежащую в диапазоне радиочастот. В статье последовательно рассмотрены вопросы синтеза функциональной оптико-электронной схемы радиотонного акселерометра, на основе двух комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами, работающими на отражение, математическая модель процесса юстировки акселерометра в области его рабочей точки, а также математическая модель процесса измерения вибраций с помощью их частотной локализации по известной шкале оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой через разность компонент двух АВБС, причем взаимное положение компонент внутри АВБС заранее известно.

Ключевые слова: трубопровод, утечка, акселерометр, волоконная брэгговская решетка, адресная волоконная брэгговская структура, комбинированная адресная волоконная брэгговская структура, математическая модель контроля рабочей точки; математическая модель измерения вибраций.

Введение

В настоящее время трубопроводный транспорт, как экономичный, стабильный и надежный метод транспортировки ресурсов, является основным средством снабжения и соединения между собой отдельных агрегатов тепловых и атомных электростанций (ТАЭС). Однако выход трубопроводов (ТП) 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 и безопасности жизни, и имуществу людей.

Поэтому для ТАЭС крайне важно разработать практичные, осуществимые и эффективные методы и системы мониторинга структурной целостности ТП, преимущественно работающие в режиме реального времени.

Автоматизированные системы мониторинга и технического диагностирования должны осуществлять оперативное диагностирование текущего технического состояния ТП, своевременное выявление возникающих дефектов и прогнозирование их развития [1-2]. Мониторинг должен своевременно передавать 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 мониторинга и динамике их изменения [3].

На протяжении многих лет основное внимание исследователей в отношении волоконно-оптических технологий мониторинга, как наиболее устойчивым к помехам в условиях работы на ТАЭС, было сосредоточено на разработке волоконных брэгговских решеток (ВБР) или структур (ВБС) с повышенной чувствительностью и низкой стоимостью систем их опроса – интеррогаторов – на разных длинах волн [4,5]. Для относительно низкочастотных приложений, таких как тепловые, это не самый важный фактор. В то время как правильный динамический отклик, соответствующая упаковка ВБР и ВБС, а также их сетевые возможности (мультиплексирование, адресность) являются гораздо более важными проблемами. Более того, в некоторых приложениях ТАЭС датчики должны выдерживать чрезвычайно высокие температуры, давления и вместе с тем быть высокочувствительными к слабым вибрационным сигналам, возникающим в случаях формирования утечек [3]. 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 технологии адресных ВБС (АВБС), адаптированных к ним [6,7].

Научные исследования и практические результаты последних лет, подчеркнули преимущества датчиков, основанных на оптических технологиях, например, при измерении относительных и абсолютных смещений, температуры и давления [8-11]. Эти датчики имеют явные преимущества перед традиционными для применения в суровых условиях или при высоком риске, когда безопасное использование электрических датчиков невозможно. В том числе рассмотрены технологии АВБС, датчики на их основе и методы установки датчиков на ТП. Современные АВБС могут обнаруживать широкий спектр возмущений, таких как температура, деформация, давление, акустические колебания, скорость течения и др. Рассматриваемые нами три ключевых параметра для онлайн мониторинга могут быть сведены к давлению и его изменениям.

Приведенный анализ достоинств и недостатков различных типов ВБР и АВБС позволил выбрать структуру акселерометра, построенного на комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами [12], разработать принцип юстировки его рабочей точки и измерения вибраций, вызванных собственными колебаниями ТП и утечками, что последовательно рассмотрено в настоящей статье.

1. Структурная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами

На рис. 1 представлена обобщенная оптическая схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазоволновой компонентами, работающих на отражение и пропускание.

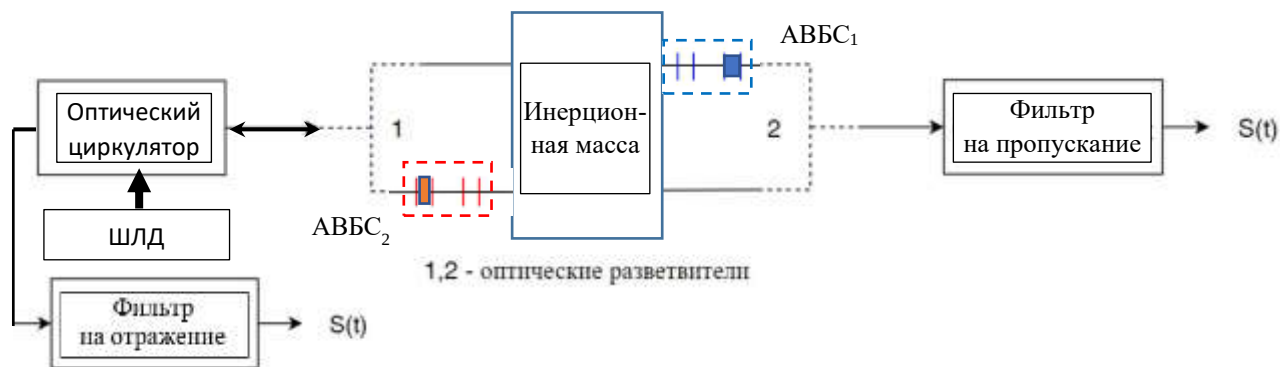


Рис. 1. Обобщенная оптическая схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС_{1,2} с волновой (заполненный квадрат) и фазо-волновой (две параллельные линии) компонентами, работающих на отражение и пропускание

На рис. 2 представлена структура и спектральная характеристика основного чувствительного элемента акселерометра - комбинированной АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами.

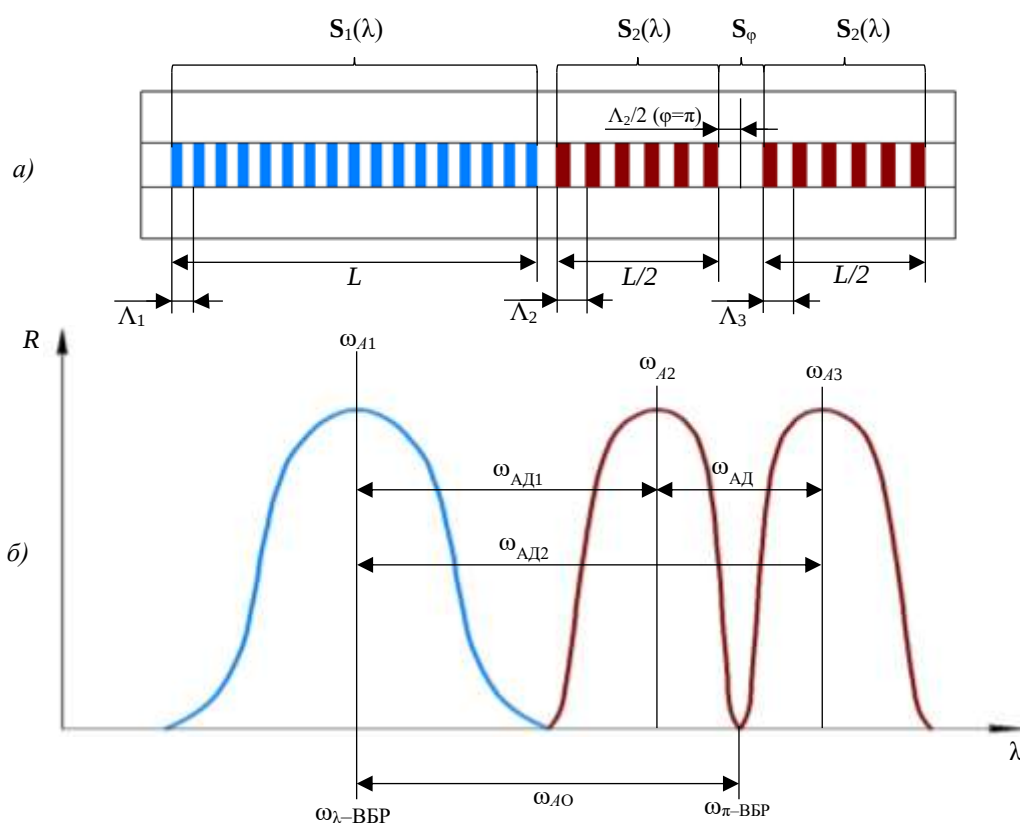


Рис. 2. Комбинированная АВБС с волновой (слева) и фазо-волновой (справа) компонентами: а) – структура, б) – условная спектральная характеристика отражения

Синтезированная структурная оптико-электронная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами представлен на рис. 3. Широкополосный лазерный диод (ШЛД)

формирует непрерывное лазерное излучение, которое через оптический циркулятор поступает на два волоконных луча акселерометра, каждый из которых содержит одну из АВБС включенных встречно друг к другу фазо-волновыми компонентами (рис. 1,2).

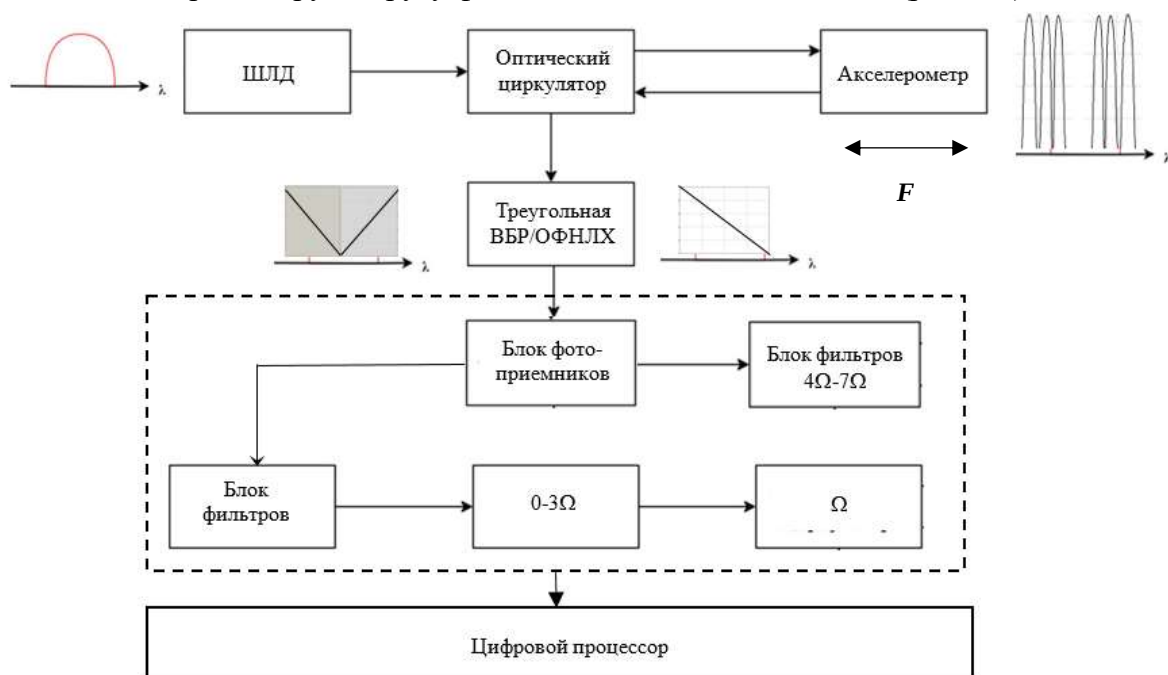


Рис. 3. Структурная опто-электронная схема волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом двух комбинированных АВБС с волновой и фазо-волновой компонентами, работающими на отражение

Для упрощения дальнейшего описания будем использовать следующие обозначения: волновая компонента - λ -ВБР, фазо-волновая компонента - λ/π -ВБР, комбинированная АВБС - $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Под действием внешней силы F , действующей в направлении оптического волокна, происходит смещение инерционной массы (рис. 1), которая растягивает (сжимает) АВБС₁ и одновременно сжимает (растягивает) АВБС₂. Оптический сигнал, отраженный от АВБС, попадает на треугольную ВБР и оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой (ОФНЛХ), работающие на пропускание, и далее на узкополосный и широкополосный фотоприемники соответственно, входящие в блок фотоприемников. Первый канал – из треугольной ВБР и узкополосного фотоприемника используется для контроля рабочей точки акселерометра и контроля утечек малой интенсивности. Второй канал из ОФНЛХ и широкополосного фотоприемника используется для определения положения каждой компоненты АВБС с учетом их адресных частот для дальнейшего определения направления и величины приложенной силы F .

На узкополосный фотоприемник поступит два двухчастотных лазерных излучения, сформированных частотными откликами λ/π -ВБР $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, с парно симметричными и одинаковыми амплитудами. В общем случае амплитуда составляющих будет зависеть от положения АВБС относительно положения и параметров спектральной характеристики треугольной ВБР, а разнос частот в каждой паре будет определяться адресной частотой.

На широкополосный фотоприемник поступит два трехчастотных лазерных излучения, сформированных частотными откликами λ -ВБР и λ/π -ВБР $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, с амплитудами, зависящими от положения АВБС относительно положения и параметров спектральной характеристики ОФНЛХ.

При этом центральные длины волн треугольной ВБР и ОФНЛХ, работающих на пропускание, совпадают.

Данные с фотоприемников поступают на два блока фильтров – один, соединенный с выходом узкополосного, а второй с выходом широкополосного фотоприемников.

Фильтры настроены так, чтобы выделять сигналы биений от компонент АВБС и далее в цифровом процессоре преобразовывать их в параметры рабочей точки и вибрации.

2. Математическая модель процесса юстировки рабочей точки акселерометра и измерения малоинтенсивных вибраций в ее области

Зададим начальные условия:

- $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС включены встречно друг другу λ/π -ВБР компонентами;
- λ/π -ВБР компоненты обеих $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС одинаковы по амплитудным и спектральным характеристикам, имеют одинаковую адресную частоту $\omega_{АД,1}=\omega_{АД,2}=\Omega$;
- за счет преднатяжения волокна λ/π -ВБР компоненты находятся на противоположных с ВБР компонентами сторонах от рабочей точки на частотном расстоянии друг от друга, равном Ω ;
- при приложении силы F (вектор силы направлен влево) левая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС1 сдвигается влево (сжимается), правая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС2 сдвигается вправо (растягивается), если вектор силы направлен вправо все движения АВБС обратны;
- спектральные компоненты излучения лазера, отраженные от компонент АВБС, для удобства анализа представим как одночастотные;
- для анализа используем треугольную ВБР, работающую на пропускание с центральной длиной волны, расположенной по середине между λ/π -ВБР компонентами.

Ситуационно спектральное положение компонент АВБС показано на трех следующих рисунках. Рис. 4 представляет стадию преднатяжения волокон акселерометра.

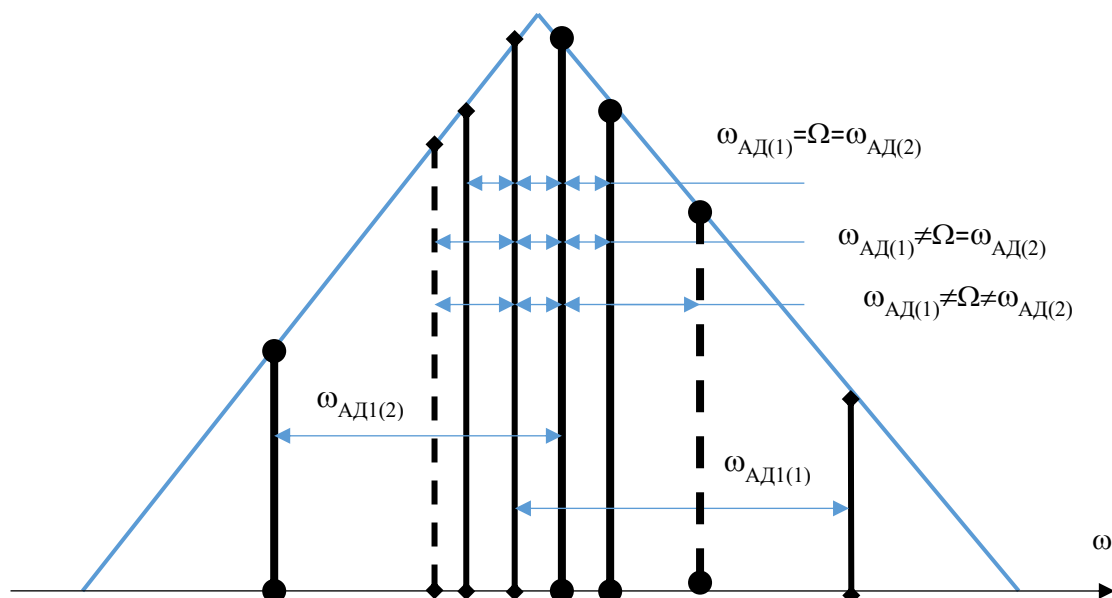


Рис. 4. Ситуационный частотный план для стадии преднатяжения

1. Математическая запись излучения отраженного от обеих $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС для анализа определения положения рабочей точки и вибраций от утечек малого уровня представляет собой колебания оптических составляющих на частотах $\omega_{А2}$ и $\omega_{А3}$ (рис. 2) $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂, которые прямо связаны с центральными и адресными частотами

λ/π -ВБР компонент $(\omega_{A2(1,2)} + \omega_{A3(1,2)})/2 = \omega_{AD(1)}/2 = \omega_{AD(2)}/2 = \omega_{\pi\text{-ВБР}(1,2)}$. Сумма указанных колебаний для случая преднатяжения (рис. 4) имеет вид:

$$S(t) = A_{A3(2)} \sin(\omega_{A3(2)} t + \phi_{A3(2)}) + A_{A2(2)} \sin(\omega_{A2(2)} t + \phi_{A2(2)}) + A_{A2(1)} \sin(\omega_{A2(1)} t + \phi_{A2(1)}) + A_{A3(1)} \sin(\omega_{A3(1)} t + \phi_{A3(1)}) \quad (1)$$

где $A_{A2(1,2)} = A_{A3(1,2)}$ – амплитуды отраженного излучения от компонент, определяющих адресные частоты $\omega_{AD(1)}$ и $\omega_{AD(2)}$, а $\phi_{A2(1,2)}$ и $\phi_{A3(1,2)}$ – их фазовые компоненты.

Напомним, что после оптического циркулятора и перед узкополосным фотоприемником установлена треугольная ВБР со спектральной характеристикой, который изменяет амплитуды частотных откликов от адресных составляющих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂. Параметры угла наклона q при основании треугольной ВБР и смещения ее центральной частоты b , выбираются, исходя из параметров измерительной системы, и считаются известными. Изменение спектральных характеристик откликов двух АВБС, прошедших через треугольную ВБР отражены на рис. 4.

Спектральную характеристику треугольной ВБР зададим в виде линейной зависимости ее склонов:

$$L(\omega) = q|\omega - \omega_{PT}| + b, \quad (2)$$

где q и b – параметры, описывающие левый и правый склоны треугольной ВБР, ω_{PT} – частота рабочей точки акселерометра.

Амплитуды $A_{A3(1,2)}$ и $A_{A2(1,2)}$ адресных составляющих λ/π -ВБР компонент, сформированных ими после прохождения треугольной ВБР изменятся в соответствии с их смещением по оси частот:

$$A'_{A3(1,2)} = A_{A3(1,2)} [q(\omega_{PT} \pm 3\Omega/2) + b], \quad (3.1)$$

$$A'_{A2(1,2)} = A_{A2(1,2)} [q(\omega_{PT} \pm \Omega/2) + b], \quad (3.2)$$

где переменная $\Omega = \omega_{AD1} = \omega_{AD2}$ и определяет величину преднатяжения (рис. 4).

На узкополосном фотоприемнике будут сформированы колебания биений для составляющих всех частот, указанных в (3.1) и (3.2), из которых с помощью блока фильтров будут выделены составляющие на частотах Ω , 2Ω и 3Ω .

Итоговое выражение, связывающее мощность микроволнового сигнала после фотоприемника с попадающим на него оптическим излучением и микроволновых фильтров, примет вид:

$$P(t) = S(t) S^*(t) \sim \Re \left\{ \begin{aligned} & A_{3(2)}'^2 + A_{2(2)}'^2 + A_{2(1)}'^2 + A_{3(1)}'^2 + \\ & \left[A_{3(2)}'^2 A_{2(2)}'^2 + A_{2(2)}'^2 A_{2(1)}'^2 + A_{2(1)}'^2 A_{3(1)}'^2 \right] \cos \Omega t + \\ & + \left[A_{3(2)}'^2 A_{2(1)}'^2 + A_{2(2)}'^2 A_{3(1)}'^2 \right] \cos 2\Omega t + \\ & \left[A_{3(2)}'^2 A_{3(1)}'^2 \right] \cos 3\Omega t \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $\Re$ – коэффициент, учитывающий потери в фильтрах и коэффициент преобразования фотоприемника.

На основе анализа параметров огибающих биений (4), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая преднатяжения $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра.

Условием выполненной процедуры преднатяжения являются равенство 1 коэффициентов модуляции огибающей биений на частотах Ω , 2Ω и 3Ω при равенстве $\omega_{\text{АД}(1)} = \omega_{\text{АД}(2)} = \Omega$. При выполнении условия $\omega_{\text{АД}(1)} \neq \omega_{\text{АД}(2)} = \Omega$ или $\omega_{\text{АД}(1)} \neq \omega_{\text{АД}(2)} \neq \Omega$ основным условием выполнения стадии преднатяжения является равенство коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω :

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \Re \left\{ \begin{array}{c} \dots + \\ A_{2(2)}'^2 A_{2(1)}'^2 \cos \Omega t + \\ + [\dots] \cos \dots t + \\ [\dots] \cos \dots t \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Для простоты изложения другие компоненты биений в (5) мы не указываем.

2. Рассмотрим смещение инерционной массы под воздействием силы F влево на величину равную в частотном выражении Ω (рис. 5) при начальных условиях задачи. Исходя из начальных условий при приложении силы F левая $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС1 сдвигается влево (сжимается), правая $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС2 сдвигается вправо (растягивается) – вектор силы направлен влево. При этом λ/π -ВБР компоненты $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} спектрально совпадут: для $A_{\text{А}2(1,2)} = A_{\text{А}3(1,2)}$ одинаковое спектральное положение будут иметь $A_{\text{А}2(1)}$ и $A_{\text{А}3(2)}$, а также $A_{\text{А}3(1)}$ и $A_{\text{А}2(2)}$.

В дальнейшем данное положение $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} будем считать определяющим «нулевую рабочую точку» акселерометра. Сумма колебаний, соответствующих отраженным от адресных π -ВБР компонент для случая нулевой рабочей точки (рис. 5) имеет вид:

$$S(t) = 2A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]} \sin(\omega_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]}t + \phi_{\text{А}3(2)} + \phi_{\text{А}2(1)}) + \\ + 2A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]} \sin(\omega_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]}t + \phi_{\text{А}2(2)} + \phi_{\text{А}3(1)}). \quad (6)$$

Амплитуды $A_{\text{А}3(1,2)}$ и $A_{\text{А}2(1,2)}$ адресных составляющих π -ВБР компонент, сформированных ими после прохождения треугольной ВБР изменятся в соответствии с их смещением по оси частот и будут определяться как (3.1) и (3.2):

$$A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]}'' = A_{[\text{А}3(2), \text{А}2(1)]} [q(\omega_{\text{РТ}} + \Omega/2) + b], \\ A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]}'' = A_{[\text{А}2(2), \text{А}3(1)]} [q(\omega_{\text{РТ}} - \Omega/2) + b]. \quad (7)$$

Итоговое выражение, связывающее мощность микроволнового сигнала после прохождения (6) треугольной ВБР (7), фотоприемника с попадающим на него оптическим излучением и микроволновых фильтров, примет вид:

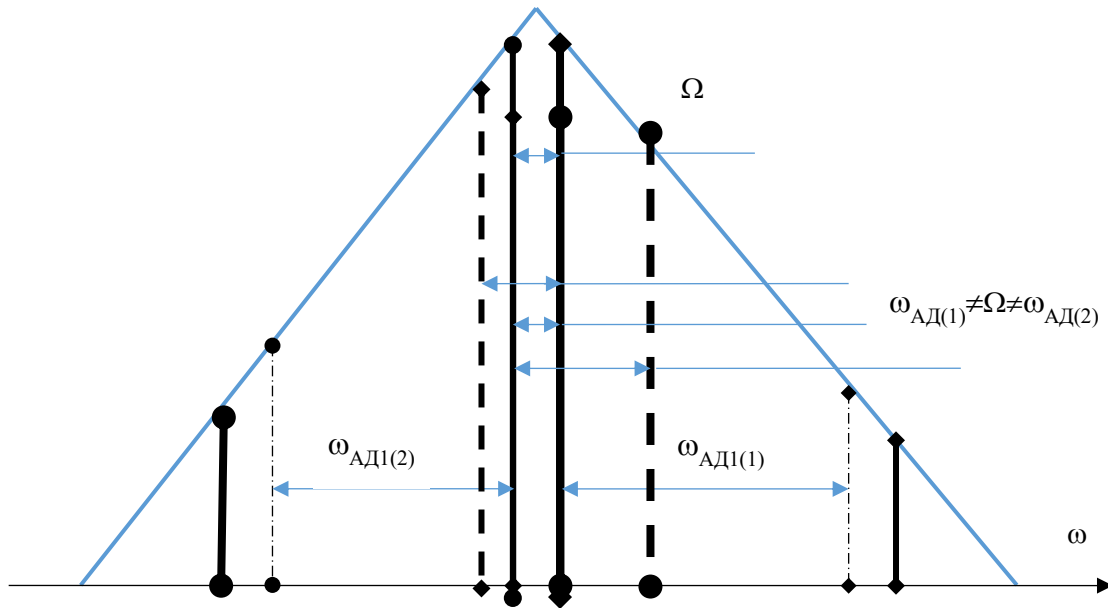


Рис. 5. Ситуационный частотный план для «нулевой рабочей точки»

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \sim \Re \left\{ \begin{aligned} &2A_{A3(2)}''^2 + 2A_{A2(2)}''^2 + 2A_{A2(1)}''^2 + 2A_{A3(1)}''^2 \\ &\left[(A_{A3(2)}'' + A_{A2(1)}'')(A_{A3(1)}'' + A_{A2(2)}'') \right] \cos \Omega t \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

На основе анализа параметров огибающих биений (8), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая «нулевой рабочей точки» $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра. В данном случае значащий сигнал будет только на выходе микроволнового фильтра, настроенного на разностную частоту $\Omega = \omega_{AD(1)} = \omega_{AD(2)}$.

«Нулевая рабочая точка» фиксируется при равенстве 1 коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω .

При выполнении условия $\omega_{AD(1)} \neq \omega_{AD(2)} = \Omega$ или $\omega_{AD(1)} \neq \omega_{AD(2)} \neq \Omega$ основным условием выполнения стадии «нулевой рабочей точки» является равенство коэффициента модуляции огибающей биений на частоте Ω , но для компонент :

$$P(t) = S(t)S^*(t) \sim \Re \left\{ \begin{aligned} &2A_{A2(2)}''^2 + 2A_{A2(1)}''^2 \\ &+ A_{A2(1)}'' A_{A2(2)}'' \cos \Omega t \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

с амплитудой отличной от (8).

3. Рассмотрим дальнейшее смещение инерционной массы под воздействием силы F влево на величину равную в частотном выражении Ω (рис. 6) при начальном условии задачи. Опуская порядок действий, аналогичный п. 1, получим на выходе

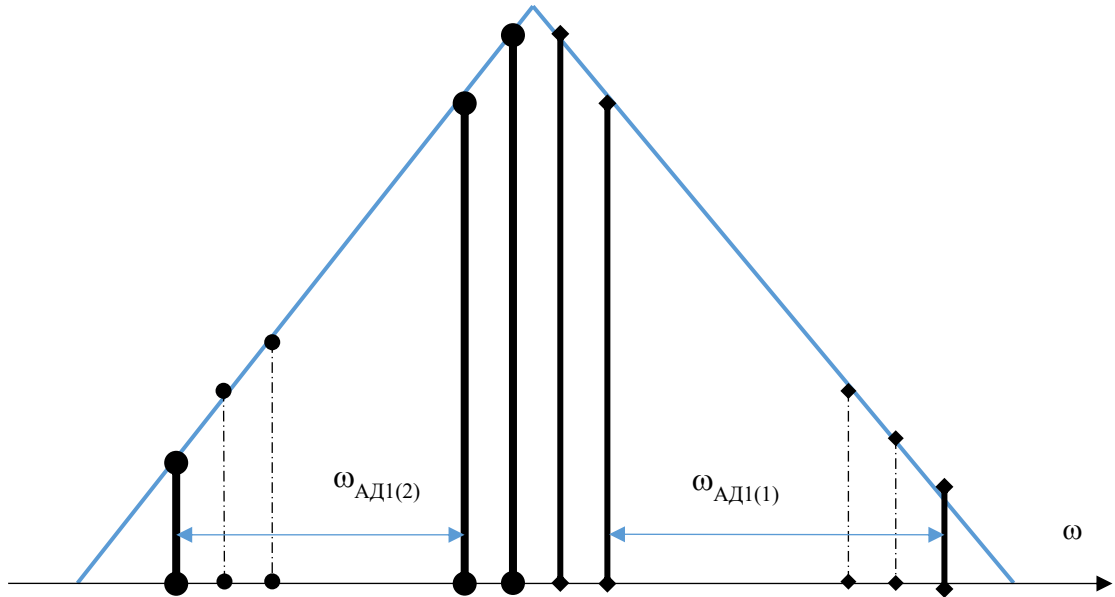


Рис. 6. Ситуационный частотный план для перевода измерений на широкополосный фотоприемник

$$\begin{aligned}
 P(t) &= S(t) S^*(t) \sim \\
 &\sim \Re \left\{ \begin{aligned} &A_{2(1)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 + A_{3(2)}'''^2 + A_{2(2)}'''^2 + \\ &\left[A_{2(1)}'''^2 A_{3(1)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 A_{3(2)}'''^2 + A_{3(2)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos \Omega t + \\ &+ \left[A_{2(1)}'''^2 A_{3(2)}'''^2 + A_{3(1)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos 2\Omega t + \\ &\left[A_{2(1)}'''^2 A_{2(2)}'''^2 \right] \cos 3\Omega t \end{aligned} \right\}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

На основе анализа параметров огибающих биений (10), прошедших через микроволновые фильтры, можно вывести зависимость разностной частоты $\omega_{\pi\text{-ВБР}(1)} - \omega_{\pi\text{-ВБР}(2)}$ для случая линейных измерений $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} акселерометра, без пересечения нулевой рабочей точки. Отличие заключается в том, что в (10) огибающую биений определяю компоненты A_2 , а в (4) компоненты A_3 .

4. Таким образом, в данном разделе рассмотрен вопрос прохождения $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} нулевой рабочей точки акселерометра. Факт прохождения сопровождается наличием сигнала огибающей биений на частоте, равной разностной частоте λ/π -ВБР компонент, на выходе соответствующего фильтра. Выходные сигналы других микроволновых фильтров будут равны 0 при равенстве адресных частот $\omega_{AD(1)} = \omega_{AD(2)}$. При неравенстве адресных частот можно использовать процедуры слежения за коэффициентом модуляции огибающей на частоте Ω , который будет равен 1 в этот момент.

Учитывая равенство амплитуд λ/π -ВБР компонент и симметричность треугольной ВБР случаи в п.1 и п.3 дадут идентичные результаты. Для определения местоположения каждой $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС необходимо использовать их адресную компоненту по λ -ВБР компонентам, расположенные асимметрично π -ВБР компонентам. В этом случае необходимо использовать ОФНЛХ и широкополосный фотоприемник или делать λ/π -ВБР компоненты с

разными адресными частотами и коэффициентами отражения (рис. 2). При максимальной частоте биений в ФВЧ больше, чем $\omega_{\text{АД1(1)}} + \omega_{\text{АД1(2)}}$ можно переходить к измерениям.

3. Математическая модель процесса локализации АВБС по наклонной линейной АЧХ оптического фильтра

Зададим начальные условия:

- $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} включены встречно друг другу λ/π -ВБР компонентами;
- λ/π -ВБР компоненты обеих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} отличны по спектральным характеристикам, имеют разную адресную частоту $\omega_{\text{АД1}} \neq \omega_{\text{АД2}}$;
- ситуационно λ/π -ВБР компоненты с λ -ВБР компонентами находятся от положения рабочей точки на произвольном расстоянии;
- для анализа используется ОФНЛХ, работающий на пропускание с центральной длиной волны, расположенной по середине между λ/π -ВБР компонентами в положении, соответствующему рассмотрению задачи (разд. 2).

Ситуационно произвольное спектральное положение компонент $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} показано на рис. 7.

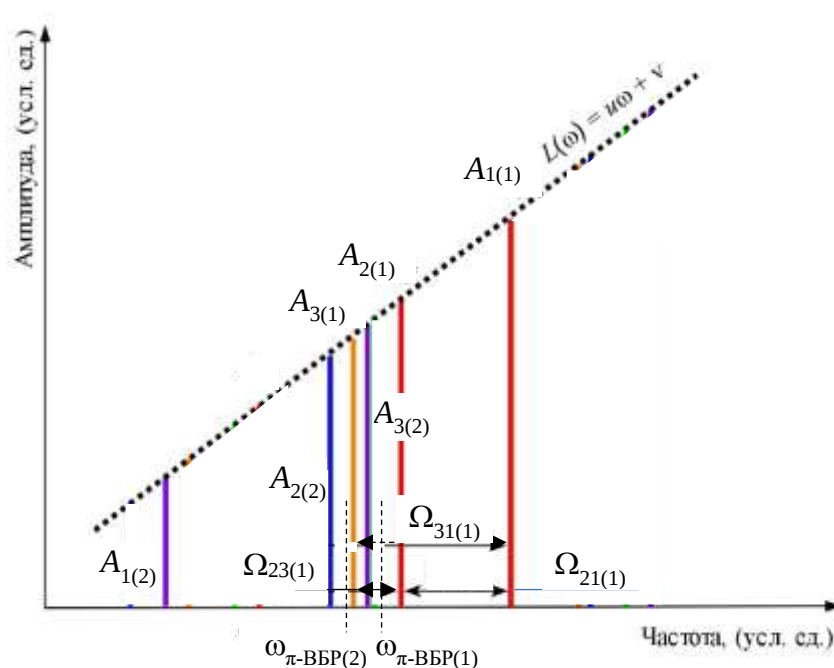


Рис. 7. Ситуационное положение $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} для решения задач измерения вибраций

Смещение центральной частоты каждой $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} вдоль ОФНЛХ ведет к изменению взаимного отношения амплитуд их адресных компонент, что влечет за собой изменение параметров огибающей биений, например, как показано на рис. 7 для адресных компонент на частотах $\Omega_{21(1)}$, $\Omega_{23(1)}$ и $\Omega_{31(1)}$ первой АВБС.

Задача однозначного определения центральной частоты одной АВБС по параметрам огибающих биений компонент на адресных частотах была решена нами ранее в [11]. Для $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС с учетом разного характера компонент такая задача не решалась. На первом этапе решим эту задачу используя упрощенное представление компонент в виде бесконечно узких адресных составляющих. Ввести понятие «центральной частоты (длины волны)»

$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} можно любым способом, позволяющим ее вычисление, для чего используем брэгговскую частоту их средней (второй) компоненты, которую обозначим как $\omega_{2(1,2)}$:

$$\omega_{(1,2)} = \omega_{A2(1,2)}. \quad (11)$$

Задача состоит в определении «центральной частоты» $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} в амплитудно-частотной плоскости для дальнейшего определения их изменений для вычисления амплитуды и частоты вибрации, вызванных утечками в ТП.

Отраженное от $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} лазерное излучение, поступающее на ОФНЛХ (рис. 1), записывается в виде:

$$S(t) = A_{1(1)} \sin(\omega_{A1(1)} t) + A_{2(1)} \sin(\omega_{A2(1)} t) + A_{3(1)} \sin(\omega_{A3(1)} t) + \\ + A_{1(2)} \sin(\omega_{A1(2)} t) + A_{2(2)} \sin(\omega_{A2(2)} t) + A_{3(2)} \sin(\omega_{A3(2)} t). \quad (12)$$

Левая и правая оптические компоненты $A_{1(1,2)}$ и $A_{3(1,2)}$ могут быть выражены через центральную брэгговскую (оптическую) частоту и адресные (радио) частоты $\Omega_{21(1,2)}$, $\Omega_{23(1,2)}$:

$$\omega_{A1(1,2)} = \omega_{(1,2)} \pm \Omega_{21(1,2)}; \omega_{A3(1,2)} = \omega_{(1,2)} \mp \Omega_{23(1,2)}. \quad (13)$$

При внимательном анализе (16) и (13) с учетом встречного включения $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}, можно сделать вывод о том, что не только индексы 1 и 2 меняются местами, но и компоненты A и C находятся с разных сторон от центральной компоненты, что свидетельствует о «комбинированной симметрии».

Известными величинами в (16) и (13) являются адресные частоты $\Omega_{21(1,2)}$, $\Omega_{23(1,2)}$, а неизвестными величинами являются все амплитуды адресных компонент $A_{1(1,2)}$, $A_{2(1,2)}$ и $A_{3(1,2)}$ (6 величин) и положения центральных частот $\omega_{(1,2)}$ (2 величины) $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}.

Добавим шесть требований, что точки $(\omega_{A1(1,2)}; A_{1(1,2)})$, $(\omega_{(1,2)}; A_{2(1,2)})$, $(\omega_{A3(1,2)}; A_{3(1,2)})$ связаны соотношениями:

$$A_{1(1,2)} = A_{2(1,2)} \pm u\Omega_{21(1,2)}; A_{2(1,2)} = u\omega_{(1,2)} + v; A_{3(1,2)} = A_{2(1,2)} \mp u\Omega_{23(1,2)}, \quad (14)$$

поскольку они все проходят через один и тот же фильтр с известной наклонной амплитудно-частотной характеристикой:

$$L(\omega) = u\omega + v. \quad (15)$$

Выражение для выходного тока фотоприемника для (12) с учетом (14) будет содержать:

- квадратичные составляющие компонент (12) – 6 штук;
- составляющие биений компонент на адресных частотах $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ – 3 штуки;
- составляющие биений компонент на адресных частотах $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ – 3 штуки;
- составляющие биений между компонентами $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ на произвольных частотах, вызванных вибрациями и соответствующим положением обеих АВБС по длине ОФНЛХ – 9 штук.

Принимая во внимание наличие «комбинированной симметрии», учитывая соотношения для связи адресных компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} выражение для выходного тока фотоприемника можно переписать в виде (16).

Подставив (14) в (16), получим зависимость выходного тока фотоприемника, от двух неизвестных величин ω_1 и ω_2 .

$$\begin{aligned}
 I(t) = & \sum_{i=1}^2 (A_{1,i}^2 + A_{2,i}^2 + A_{3,i}^2) + \\
 & + 2 \sum_{i=1}^2 A_{1,i} A_{2,i} \cos(\Omega_{21i} t) + A_{2,i} A_{3,i} \cos(\Omega_{23i} t) + A_{1,i} A_{3,i} \cos((\Omega_{21i} + \Omega_{23i}) t) + \\
 & + 2 \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & A_{1,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{1,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{1,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{1,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] + \\ & A_{2,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{2,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{2,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{2,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] + \\ & A_{3,i} A_{1,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{1,i+1}}\right) t\right] + A_{3,i} A_{2,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{2,i+1}}\right) t\right] + A_{3,i} A_{3,i+1} \cos\left[\left(\Omega_{A_{3,i} A_{3,i+1}}\right) t\right] \end{aligned} \right\}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

В силу громоздкости записи итогового уровня предложим более простой вариант. Введем функцию $F(\Omega_F, \Omega)$ частотного полосового фильтра, близкую к функции нормального распределения за исключением нормирующего множителя, так чтобы функция полосового фильтра почти везде равнялась нулю, за исключением окрестности точек адресных частот обеих $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2}:

Обозначим объединенное множество значений: 0 (постоянный уровень сигнала), множество адресных частот $\Omega_{21,i}$, $\Omega_{23,i}$ и множество сумм адресных частот $\Omega_{31,i}$ (рис. 7):

Отфильтровав сигнал (16), на частотах $F(\Omega_F, \Omega)$, получим переопределенную систему из семи уравнений для нахождения двух неизвестных ω_1 и ω_2 .

$$\{\Omega_{F,n}\}_{n=1,3N+1} = \{0\} \cup \{\Omega_{21i}\} \cup \{\Omega_{23i}\} \cup \{\Omega_{21i} + \Omega_{23i}\}, \forall i = \overline{1, N}, N=2. \quad (17)$$

Решение переопределенной системы уравнений можно проводить методом наименьших квадратов. Данную систему уравнений можно решить только численно. В качестве начальных условий можно взять те значения ω_i , которые являются решением системы уравнений в которых предполагается, что последних трех двойных сумм в ней не существует (рабочая точка акселерометра). После чего система уравнений, дополненная начальными значениями, решается любым хорошо сходящимся итерационным методом, например, Левенберга-Маргквардта или Ньютона-Раффсона.

4. Математическая модель процесса измерения вибрации

Ускорение (вибрация) – физическая величина, определяющая быстроту изменения скорости тела, то есть первая производная от скорости по времени, вызванной возникновением как собственных колебаний ТП при течении в нем жидкости, так и дополнительных колебаний, вызванных утечками.

В рамках применяемой модели акселерометра ускорение a вдоль оси волокон с записанными в них $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС_{1,2} может быть выражено как:

$$a = F/m, \quad (17)$$

где m – инерционная масса.

Пренебрегая упругим сопротивлением анизотропно-упругого подвеса, будем учитывать только модуль упругости волокна k . Тогда для обеих волокон по закону Гука получим:

$$F = k\Delta l, \quad (18)$$

где Δl – абсолютное удлинение волокна для $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ со знаком плюс и укорочение для $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ со знаком минус.

Относительное изменение длины волокна будет равно $\Delta l/l$, следовательно, точно так же относительно изменится и период решеток и их компонент. Учитывая связь периодов средних компонент $\Lambda_{1,2}$ и их брэгговских частот $\omega_{1,2}$ или длин волн $\lambda_{1,2}$ в невозмущенном состоянии, получим:

$$\lambda_1 + \Delta\lambda_1 = 2n_{\text{eff}} \Lambda_1 \left(1 + \frac{F}{kl} \right), \quad (19)$$

$$\lambda_2 - \Delta\lambda_2 = 2n_{\text{eff}} \Lambda_2 \left(1 - \frac{F}{kl} \right), \quad (20)$$

где l – длина участка волокна между точками крепления в акселерометре.

Как видно, смещение брэгговских длин волн, а, следовательно, и частот $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС₂ зависит от действующей силы F и в общем случае температуры, справедливо выразить эту зависимость функциональной зависимостью:

$$\omega_1 = \omega_1(F, T), \quad \omega_2 = \omega_2(F, T). \quad (21)$$

Дифференциальная схема исполнения акселерометра, согласно предъявленным требованиям к измерительной системе и дифференциальной схеме его исполнения, позволяет минимизировать влияние дрейфа температуры на разность брэгговских частот, следовательно, для разности брэгговских частот будет справедливо в первом приближении:

$$\omega_1 - \omega_2 = \Phi(F_x) = \Phi(F), \quad (22)$$

где $\Phi(F_x)$ функциональная зависимость разностной частоты $(\omega_1 - \omega_2)$ от проекции действующей силы $F(t)$ на направление оси акселерометра – F_x . Как и ранее будем рассматривать проекцию F действующей силы F на ось волокна. Здесь и далее будем использовать неявную запись брэгговских частот в виде ω_1 и ω_2 , как функций, зависящих от F .

Изменяющееся во времени внутреннее давление трубы можно выразить как:

$$P = P_0 + P_1 \sin \omega t, \quad (23)$$

где P_0 представляет собой номинальное давление, в то время как P_1 повторяет амплитуду изменения давления с частотой $f = \omega/2\pi$. Давление в ТП будет создавать силу на стенки трубы, труба будет расширяться, и это вызовет собственную вибрацию.

Трубу можно считать тонкостенной с толщиной h , а длина волны колебаний давления намного больше диаметра d . Поскольку статические напряжения и деформации вводятся номинальным давлением, P_0 не играет определяющего значения для вывода формулы для вибрации, рассматриваются только динамические напряжения и деформации. Молекулы воды в среднем перемещаются в осевом направлении потока жидкости. Однако мно-

гие молекулы сталкиваются со стенкой трубы. В силу первого закона термодинамики определенное количество кинетической энергии, производимой молекулами, будет рассеиваться в тепло в виде турбулентных вихрей, но большая часть кинетической энергии преобразуется в потенциальную энергию в форме давления.

Вибрация в ТП, возникающая в результате цикла преобразования энергии, пропорциональна средней скорости потока в нем. Таким образом, возможно измерение частоты и амплитуды собственных колебаний ТП и определение их как пороговых. При увеличении амплитуды или изменении частоты речь идет о появлении вибраций, вызванных утечками. Анализируя разность первых и вторых можно определить параметры утечек.

Заключение

В данной статье приведена математическая модель аддитивного сигнала, возникающего в результате суммарного отклика двух $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂, используемых в качестве чувствительных элементов волоконно-оптического акселерометра с радиофотонным опросом. Определение смещения центральных частот ω_1 и ω_2 указанных АВБС осуществляется по аддитивному сигналу биений всех их адресных частот на фотоприемнике, по параметрам которого судят о приложенных физических полях на каждый датчик в отдельности.

Поставлена задача математической записи аддитивного сигнала на выходе узкополосного фотоприемника для подготовки акселерометра к работе, определения силы преднатяжения волокон, юстировки нулевой рабочей точки и анализа малоинтенсивных вибраций, вызванных «тихими» утечками, в полосе пропускания фотоприемника. Для анализа используется частотный дискриминатор в виде равнобедренной треугольной ВБР.

Поставлена задача математической записи аддитивного сигнала на выходе широкополосного фотоприемника, пригодном для его последующей адресной частотной фильтрации с использованием программных продуктов спектрального анализа. Получена переопределенная система уравнений, описывающая зависимость амплитуд выходного тока фотоприемника при фильтрации его на адресных частотах компонент $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₁ и $(\lambda + \lambda/\pi)$ -АВБС₂ в зависимости от их положения в амплитудно-частотной плоскости оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой.

Предложенные математические модели и описание задачи математической физики по определению вибрации как разности ω_1 и ω_2 позволяют осуществить переход к следующей стадии исследования, а именно к натурным экспериментам.

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

Список литературы

1. Гольянов А. А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах / А.А. Гольянов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - 2002. - № 10. - С. 5-14.
2. Кутуков С. Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах / С. Е. Кутуков // Нефтегаз. дело. - 2004. - Т. 2. - С. 29-45.
3. Prisutova, J. Use of fibre-optic sensors for pipe condition and hydraulics measurements: a review / J. Prisutova, A. Krynkin, S. Tait, et al. // Civil Engineering. - 3 (1). - P. 85-113.

4. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
5. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142.
6. Муслимов Э.Р. Спектрографы с высокой дисперсией для радиотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 6 (158). - С. 318-319.
7. Muslimov E. Spectrographs with high angular dispersion: design and optimization approach / E. Muslimov, I. Nureev, O. Morozov et al. // Optical Engineering. - 2018. - Vol. 57. - № 12. -Р. 125104.
8. 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. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343.
9. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С. 535-543.
10. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6–13.
11. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov, A. Sakhabutdinov, V. Anfinogentov et al. // Sensors. - 2020. - Vol. 20. - P. 2693.
12. 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.

FIBER-OPTIC ACCELEROMETER FOR CONTROL OF PIPELINE LEAKAGES BASED ON TWO COMBINED ADDRESSABLE FIBER BRAGG STRUCTURES WITH WAVE AND PHASE-WAVE COMPONENTS. MATHEMATICAL MODELS

¹*Rus.Sh. Misbakhov*, ²*E.V. Kulikov*

¹LLC "TatAISneft"

Russian Federation, 423458, Almet'yevsk, st. Riza Fakhret'dina, 62

²FSBI "3rd Central Research Institute" Ministry of Defense
of the Russian Federation

Russian Federation, 107564, Moscow, Pogonny proezd, 10

Abstract. Pipeline leakage detection remains an important issue, especially for the development of smart energy. Various non-destructive testing methods for pipeline leak detection have been actively developing since the end of the last century. However, research needs and technological problems still remain, especially at the stage of their implementation in practice of thermal and nuclear power plants. Researchers have shown great interest in the vibration method of leak detection. The signal of the natural frequency of pipe vibrations is monitored using an accelerometer, the parameters of which change when leaks appear. Recently, such accelerometers are based on fiber-optic technologies using one or more fiber Bragg gratings (FBG) with well-known advantages and disadvantages. The latter are mainly associated with the need to use an expensive optical spectral device for their interrogation - an interrogator. The emerging way to eliminate this drawback is the transition to budget radio-photonics interrogators operating in the radio frequency range and sensitive elements adapted to them - addressable fiber Bragg structures (AFBS). In the simplest case, AFBS are two FBGs, spectrally separated by a unique frequency that does not change under any conditions, also lying in the radio frequency range. The article consistently considers the issues of synthesis of the functional optoelectronic circuit of the microwave photonic accelerometer, based on two combined AFBS with wave and phase-wave components operating on reflection, a mathematical model of the process of adjusting the accelerometer in the region of its operating point, as well as a mathematical model of the process of measuring vibrations using their frequency localization on a known scale of an optical filter with an inclined linear characteristic through the difference in the components of two AFBS, wherein the relative position of the components inside the AFBS is known in advance.

Keywords: pipeline, leakage, accelerometer, fiber Bragg grating, address fiber Bragg structure, combined address fiber Bragg structure, mathematical model of monitoring the operating point; mathematical model of vibration measurement.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024