

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДА

Рус.Ш. Мисбахов^{1,3}, 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

³ Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева-КАИ (Альметьевский филиал)

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

Аннотация. Разрабатываемый метод контроля утечек в трубопроводе (ТП) предполагает использование ряда волоконно-оптических акселерометров, установленных по длине ТП, для непрерывного квазираспределенного мониторинга его динамического поведения. Для выбора конструкции волоконно-оптического акселерометра поставлена задача анализа существующих методов и средств контроля вибрации, вызванных утечками, основанных на использовании в них чувствительных элементов типа волоконной брэгговской решетки (ВБР), как наиболее перспективных: устойчивых к электромагнитным помехам и имеющих оптомеханику, работоспособную в широком диапазоне температур. По результатам анализа можно принять решение о влиянии чувствительного элемента на метрологические и технико-экономические характеристики акселерометра в целом, и в частности, на характеристики, определяющие его конструкцию. Общую постановку задачи анализа можно разделить на три основные части: возможность обнаружения утечек (чувствительность), пространственные характеристики анализа – устойчивость к поперечным и произвольным воздействиям, отличающихся от осевых, и, наконец, реализация функции контроля рабочей точки акселерометра. Исходя из результатов анализа по указанным критериям был выбран одноосный акселерометр с двумя параллельными волокнами, в которые встроены по одной ВБР до инерционной массы и после. В ходе анализа было обращено внимание на переход от оптоэлектронных методов опроса акселерометров к радиофотонным. Возможность такого решения подтверждается применением в акселерометре не ВБР, а нового типа чувствительного элемента – адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) волновой λ или фазовой π с одним адресом, а также их многоадресных вариантов $N\lambda$ и $N\pi$. Для опроса АВБС должен быть построен адресный радиофотонный интеррогатор, существенно более дешевый по параметру массогабаритных показателей РВСиМ (размер, вес, стоимость и потребляемая мощность), по сравнению с оптоэлектронным, а также лучший по метрологическим и технико-экономическим характеристикам. В развитие такого типа акселерометров в работе предложено использование новых АВБС комбинированного типа – $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС, основная адресная частота которых явно не выражена, т.е. не может быть определена по измерениям только на пропускание или только на отражение. Это подтверждает возможность построения линеек квазираспределенных акселерометров или их массивов сложной топологии ТП, что трудно реализуемо при использовании одно- и многоадресных АВБС, не допускающих комбинированного включения.

Ключевые слова: трубопровод, утечка, акселерометр, волоконная брэгговская решетка, одноадресная волоконная брэгговская структура, многоадресная волоконная брэгговская структура комбинированная адресная волоконная брэгговская структура, обобщенная структурная схема.

Введение

Для перехода непосредственно к выбору конструкции акселерометра определим постановку задачи анализа, после которого можно принять решение. Общую постановку задачи анализа можно разделить на три основные части: методы обнаружения утечек, пространственные характеристики анализа и локализация точки утечки. Методы обнаружения утечек можно разделить на программные [1]–[7], и аппаратные [7], [8]–[12], при этом последние будут влиять на выбор конструкции. Программные методы используют различное компьютерное программное обеспечение для обнаружения утечек и их локализации. Они, как правило, универсальны и требуют сигнальной информации с аппаратной части, в которой используются соответствующие измерения по определенному физическому методу и соответствующие чувствительные элементы (например, метод БПФ [13], метод корреляции [14]), при этом конструкции акселерометров могут быть различны. Пространственные характеристики анализа прямым образом влияют на конструкцию акселерометров, например, на количество осей измерений. Вибрационные датчики имеют разные характеристики обнаружения ускорения шумовых вибраций от утечек.

Акселерометры, которые могут содержать несколько осей измерения и высокую чувствительность к гравитации, превосходят другие типы датчиков. По мере увеличения количества осей точность датчика будет увеличиваться. Однако, выбор конструкции можно начинать с одноосной. Как правило, это ось, параллельная оси ТП. Если по одной оси невозможно определить состояние ТП, только тогда должны быть проанализированы информационные составляющие акселерометров с двух других осей или акселерометр должен представлять единую многоосную конструкцию.

Обычно акселерометры имеют маятниковый тип и работают как система масса-пружина, где инерционная масса прикреплена к основанию акселерометра с помощью упругой пружины. Движение базы под действием динамических внешних сил вызывает движение массы относительно базы, пропорциональное приложенному внешнему воздействию. В традиционных акселерометрах движения инерционных масс измеряются пьезоэлектрическими, резистивными, пьезорезистивными или емкостными элементами [13]. Измерение амплитуды вибрации происходит в результате индукции электрических токов в устройстве под действием внешних сил. Этот тип технологии оказался очень интересным и полезным во многих приложениях. Однако эти устройства при применении в больших масштабах, как это требуется в более крупных и сложных структурных системах, как ТП, требуют огромного количества проводов и могут подвергаться воздействию электромагнитных помех, ограничивающих результаты.

Научная исследования и практические результаты последних лет, подчеркнули преимущества датчиков, основанных на оптических технологиях, например, при измерении относительных и абсолютных смещений, температуры и давления [14, 15]. Эти датчики имеют явные преимущества перед традиционными для применения в суровых условиях или при высоком риске, когда безопасное использование электрических датчиков невозможно.

1 Акселерометры на волоконных брэгговских решетках

ВБР имеет особенности, которые позволяют использовать ее в акселерометрах, имея преимущества перед традиционными датчиками, основанными на других технологиях. К ним относятся возможность мультиплексирования большого количества датчиков, невосприимчивость к электромагнитным полям и способность передавать сигналы на большие расстояния без необходимости использования дополнительных усилителей [16–19]. Эти преимущества также приводят к снижению стоимости внедрения.

Типовой одноосный акселерометр с одной ВБР представлен на рис. 1 [20].

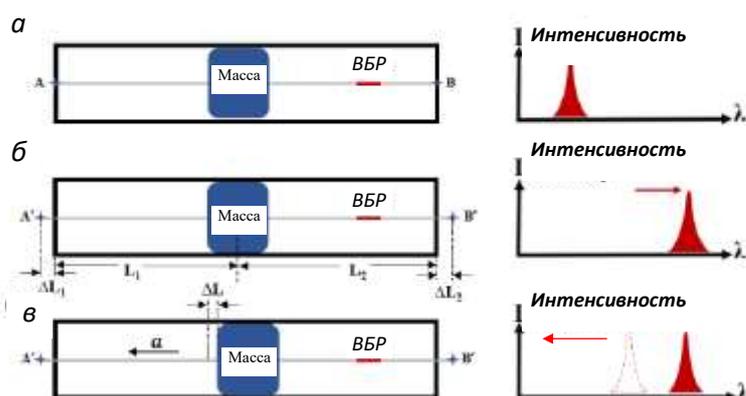


Рис. 1. Иллюстрация работы акселерометра. Центральная длина волны: до предварительного натяжения (а); предварительное натяжение с переходом в рабочее состояние (б); осевое ускорение a (в) [20]

ВБР фиксировалась с помощью инерционного блока (масса) в алюминиевой полости. Блок представлял собой симметричный цилиндр, который мог свободно колебаться внутри полости и формировать различное натяжение ВБР. На рис. 1, в показана диаграмма расположения центральной длины волны ВБР, когда структура блока подвергается осевой вибрации, что приводит к ее сдвигу влево. Волокно фиксировали сначала в точках А до В полости (рис. 1, а), а после предварительного натяжения удлиняли до точек А' до В' (рис. 1, б) для перевода в рабочий режим с отсутствием провисания волокна (рабочая точка). При любом ускорении a волокно будет натянутым без провисания, а центральная длина волны ВБР будет перемещаться пропорционально натяжению и его направлению.

В эксперименте [20] резонансные частоты акселерометров изменялись в последовательности 820, 500, 460, 440, 460 и 500 Гц соответственно начальному положению P инерционного блока. Зависимость между резонансной частотой и параметром P имеет квадратичную форму, при которой по мере увеличения параметра P резонансная частота постепенно снижается от 820 до 440 Гц, а затем увеличивается до 500 Гц. Такой акселерометр удобен для проведения исследований, но не для установки на эксплуатирующийся ТП с жесткой фиксацией и калибровкой, несмотря на очень простую конструкцию.

В [21] предложен консольный акселерометр на одной ВБР, который можно настроить для регулировки чувствительности и резонансной частоты в зависимости от объекта измерений. Механическая конструкция акселерометра представляет собой одинарную консольную балку с блоком на конце, подвешенным на определенной высоте внутри кожуховой конструкции. ВБР устанавливается и фиксируется перпендикулярно поверхности вибрирующей консольной балки через отверстие, выполненное в ограждающей конструкции.

Принципиальная схема предлагаемого консольного измерителя ускорения на основе массы [21] представлена на рис.2. В ней ВБР используется в качестве пружины, повышающей собственную частоту консоли и равномерно деформирующей решетку для повышения чувствительности системы к вибрациям. Предварительное натяжение ВБР достигается путем склеивания двух точек на конце консольной балки и ограждающей конструкции с помощью эпоксидной смолы. Эта эпоксидная смола в основном используется в качестве структурного клея для обеспечения высокой химической и температурной стойкости.

Акселерометр изготовлен с помощью аддитивных технологий. Одним из ограничений его применения является хрупкость датчиков ВБР, поэтому при установке этих датчиков следует соблюдать осторожность.

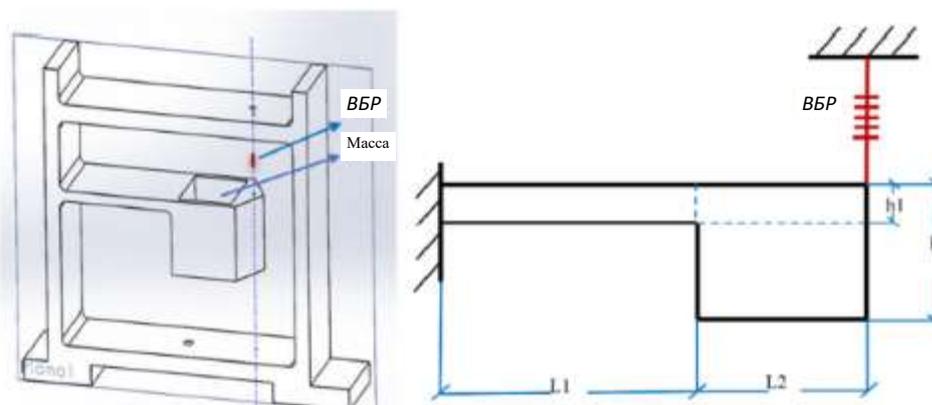


Рис. 2. Структура консольного датчика с одной ВБР: 3D изображение (а); схематический разрез (б) [21]

Несмотря на это ограничение, способность мультиплексирования датчиков ВБР, невосприимчивость к электромагнитным помехам и способность системы опроса обрабатывать больше датчиков за один раз увеличивают преимущество использования таких систем вместо традиционных. Для устранения этого недостатка можно использовать резервирование ВБР.

В [22] предложена детальная конструкция предлагаемого среднечастотного акселерометра с резервированием на двух ВБР, которая показана на рис. 3.

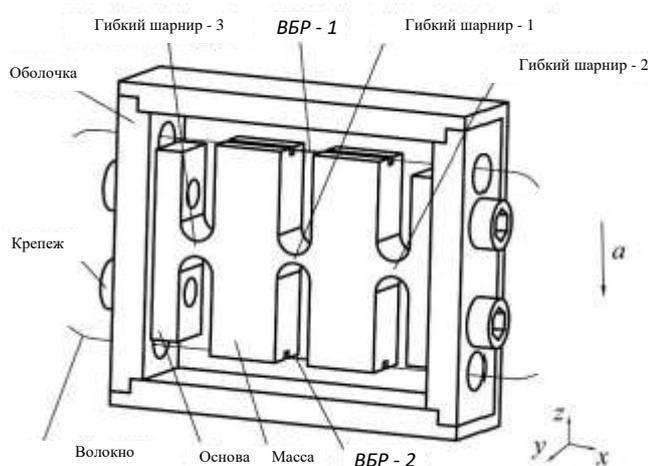


Рис. 3. Структурная схема резервированного акселерометра на двух ВБР [22]

Этот датчик в основном состоит из двух инерционных масс, трех прямых гибких шарниров, двух ВБР и основания. Датчик симметричный, размеры гибкого шарнира-2 и шарнира-3 абсолютно одинаковы. Два конца массы снабжены канавками для оптоволокон. Два конца предварительно натянутой ВБР фиксируются в пазах клеем. ВБР подвешивается над гибким шарниром-1, а основание и оболочка пакета соединяются резьбой. Таким образом, датчик одноосный, состоит из двух подобных.

Когда возбуждение ускорения в направлении измерения генерируется извне, две массы будут слегка вращаться вокруг центра гибкого шарнира-2 и гибкого шарнира-3 соответственно, заставляя ВБР растягиваться или сжиматься и преобразовывать вибрационное ускорение в деформации и сдвиги длин волн двух ВБР. Сигналы вибрации могут быть

получены из сдвигов длин волн двух ВБР. В этой конструкции три прямых круглых гибких шарнира соединяют две массы и основание в единое целое. Конструкция шарнир-масса-шарнир может повысить общую жесткость датчика по сравнению со структурой шарнир-масса. Между тем, две конструкции ВБР удваивают чувствительность датчика, обеспечивая при этом температурную самокомпенсацию.

Более простая конструкция, близкая к консольной, предложена в [23]. Предлагаемый оптоволоконный акселерометр основан на двух ВБР, расположенных в противоположных положениях. Акселерометр изготовлен из цельной латунной детали, а его конструкция состоит из концентрированной инерционной массы, поддерживаемой Г-образной консольной балкой, соединенной с основанием тонким анизотропно-упругим элементом (толщиной 1,1 мм) и двумя ВБР. Под действием внешних ускорений инерционная масса движется по вертикальной оси, вызывая сжатие в одной из ВБР и растяжение в другой. Движение инерционной массы происходит не исключительно по вертикальной оси, но за счет ограниченной возможности движения по другим осям, его можно считать таковым.

Схема и размеры акселерометра показаны на рис. 4. ВБР1 и ВБР2 закреплены между точками, обозначенными А и Б соответственно.

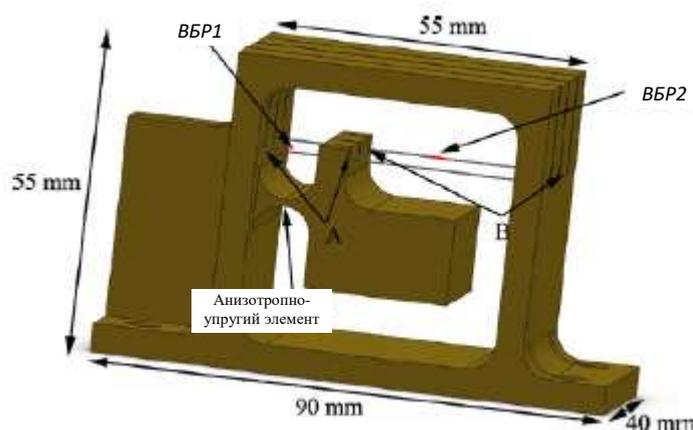


Рис. 4. Схема и размеры акселерометра на двух встречных ВБР [23]

Размеры анизотропно-упругого тонкого элемента определяют диапазон и чувствительность акселерометра и минимизируют поперечную чувствительность [24]. Резонансная частота также зависит от модуля Юнга оптического волокна [25]. Такая компоновка позволяет акселерометру быть нечувствительным к поперечной чувствительности и колебаниям температуры окружающей среды. При наличии этих эффектов обе ВБР подвергаются одинаковому воздействию.

Воспользуемся решением (рис. 4) и простотой конструкции решения (рис. 1) и предложим конструкцию для горизонтального одноосного акселерометра, которую будем рассматривать в статье. Подобная конструкция предложена в [26] и рассматривалась в [27-29] в рамках работ школы радиофотоники КНИТУ-КАИ, в которых выполнялись эти работы, но с другими типами чувствительных элементов на основе ВБР. В результате было определено, что тип чувствительных элементов существенно влияет на метрологические характеристики акселерометров.

Схема конструкции акселерометра приведена на рис. 5. Измерение ускорения a проводится вдоль оси OB , в предположении, что на неё существует проекция F действующей силы F , как совокупности инерциальной, гравитационной и центробежной сил.

Между двумя боковыми бортами П-образного профиля 1, являющегося жесткой основой датчика, размещается инерционный блок 4. Конструкция анизотропно-упругого элемента 2 инерционного блока 4 реализована так, чтобы исключить или минимизировать любое ее относительное поперечное смещение от измерительной оси OB .

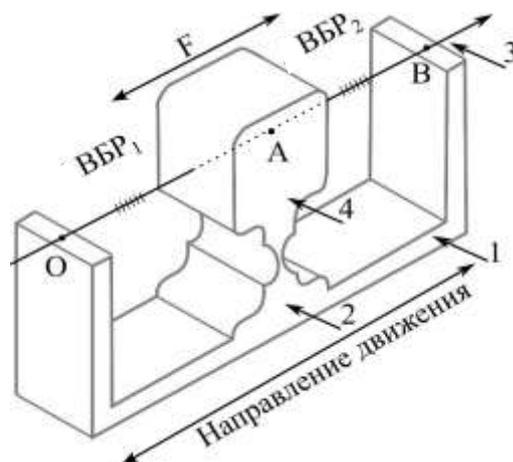


Рис. 5. Выбранная для исследований схема акселерометра:

- 1 – основа, выполненная в виде П-образного профиля;
 2 – анизотропно-упругий элемент; 3 – оптические волокна; 4 – инерционный блок (масса)

В инерционной массе 4 выполняется сквозное отверстие, через которое пропускается и в которой закрепляется оптическое волокно 3 со сформированными в нем ВБР с одинаковыми центральными длинами волн. Под действием ускорения происходит отклонение инерционной массы 4 от положения равновесия, что влечет за собой, например, растяжение волокна, содержащего ВБР₁, и одновременное уменьшение предварительного натяжения волокна, содержащего ВБР₂. Конструкция датчика предусматривает термостатированный корпус, который обеспечивает равномерное поле температуры внутри корпуса датчика. Любое температурное воздействие приводит к одновременному и одинаковому растяжению/сжатию участков волокна, содержащих ВБР₁ и ВБР₂, при условии равенства расстояний OA и AB и одинаковых начальных натяжений участков волокна, содержащих ВБР. При одновременном и одинаковом смещении брэгговских частот ВБР₁ и ВБР₂ разностная частота между ними, определяющая смещение нулевого уровня, также будет оставаться неизменной.

Центральная длина волны датчиков на основе ВБР₁ и ВБР₂, по которой определяется ускорение, требует соответствующих методов опроса для демодуляции сигнала датчика. В последние годы было предложено несколько методов, в частности, основанных на простой интерферометрии [30], фильтрах Фабри-Перо [31], согласованных решетках [32], акустооптических перестраиваемых фильтрах [33], длиннопериодных решетках [34,35], петли Саньяка на основе чирпированных ВБР [36] или многопортового волоконного интерферометра Маха-Цендера для опроса нескольких датчиков [37]. Эти решения обеспечивают высокое разрешение в области длин волн, но представляют собой относительно сложные системы с высокими затратами на внедрение [38]. Метод согласованных решеток обычно использует одну ВБР в качестве эталона отдельно от датчика.

В данной работе мы будем использовать радиофотонный интеррогатор, существенно более дешевый по параметру массогабаритных показателей РВСиМ (размер, вес, стоимость и потребляемая мощность). Возможность такого использования определяется типом чувствительного элемента, а именно, АВБС, что будет рассмотрено в следующем подразделе.

2. Акселерометры на адресных волоконных брэгговских структурах

Схема отражательного акселерометра на ВБР [26], работающих на отражение (назовем их λ -ВБР), приведенная на рис. 5, была использована далее в работах Казанской школы радиофотоники для построения акселерометров различного назначения, работающих на пропускание, с использованием ВБР с фазовым π -сдвигом (π -ВБР), АВБС с двумя, тремя и четырьмя фазовыми π -сдвигами (2π -АВБС, 3π -АВБС, 4π -АВБС соответственно). Для оценки их достоинств и преимуществ проведен сравнительный анализ, результаты которого сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ обобщенных характеристик акселерометров, использующих две ВБР/АВБС различных типов

Тип ВБР/АВБС	Анализируемый сигнал	Определение РТ	Точность	Сложность
λ -ВБР	Отражение	–	–	+
π -ВБР	Пропускание	–	\pm	+
2π -АВБС	Пропускание	+	+	\pm
3π -АВБС	Пропускание	+	++	–
4π -АВБС	Пропускание	+	++	–
$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС	Отражение	+	++	++
$(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС	Пропускание	+	++	++

Применение для ВБР₁ и ВБР₂ π -ВБР позволяет регистрировать колебания инерционной массы на частоте биений между составляющими излучения, прошедшими на фотоприемник через окна прозрачности. Это впервые позволило проводить обработку сигнала вибраций на радиочастотах, в области минимальных шумов фотоприемника, что позволяет избавиться от влияния низкочастотных шумов фотоприемника. Однако максимальное отклонение инерционной массы от рабочей нулевой точки, которая определяется уровнем по постоянному току, требует применения широкополосного фотоприемника диапазона в десятки ГГц. Второй недостаток заключается в неопределенности положения инерционной массы от рабочей точки при измерении частоты биений, которая будет одинакова при ее одинаковом отклонении вправо и влево.

Устранить эти недостатки позволило применение вместо ВБР₁ и ВБР₂ 2π -АВБС – АВБС на базе ВБР с двумя фазовыми сдвигами. Для использования преимуществ решения (рис. 4) в конструкцию (рис. 5) внесены изменения, выделенные цветом. АВБС установлены на разных волокнах (рис. 6), что дополнительно позволяет увеличить устойчивость акселерометра к поперечным ускорениям.

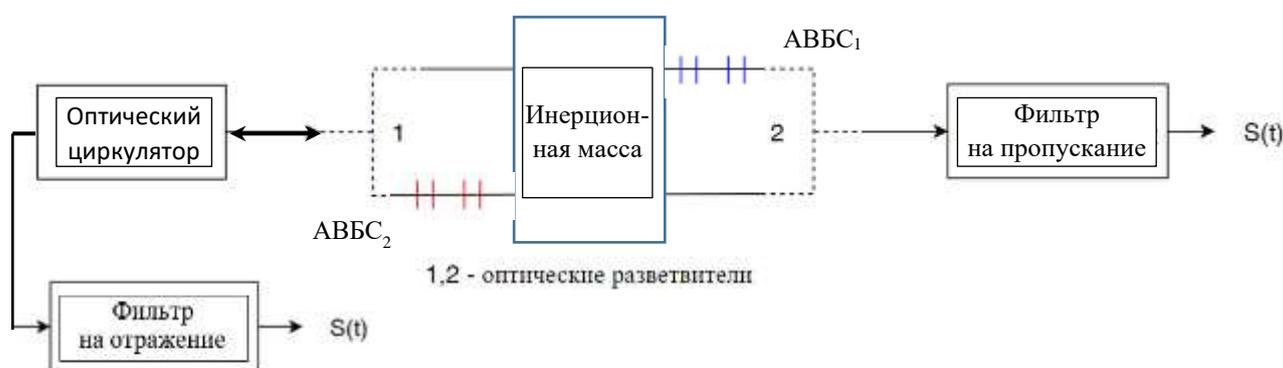


Рис. 6. Обобщенная схема модернизированного акселерометра

Обработка вибрационного сигнала осуществляется по сигналам частоты биений адресных компонент на выходе узкополосных фильтров (100 кГц) настроенных на адресную частоту каждой 2π -АВБС.

Положение инерционной массы определяется по их амплитудам в соотношении с АЧХ фильтра, имеющей линейный наклонный вид. Тем самым всегда можно сказать сжата (минимальная амплитуда) или растянута (максимальная амплитуда) 2π -АВБС с уникальной адресной частотой. Проблемой в акселерометре такого типа является достаточно широкий диапазон частот требуемого фотоприемника при регистрации крайних положений инерционной массы. Кроме того, в ряде ситуаций, возникающих в области малых колебаний могут возникнуть коллизии, связанные с совпадением разностных частот между двумя 2π -АВБС и их адресных частот. Избежать последнего недостатка можно при использовании 3π -АВБС и 4π -АВБС, в которых число таких коллизий приближается к нулю в рамках рассмотрения только массива акселерометров. Для одно акселерометра таких коллизии в случае 3π -АВБС и 4π -АВБС не существует. Основным условием устранения коллизий является асимметричное положение адресных компонент. Таким образом, если для одной пары компонент коллизия есть, то для другой она отсутствует, а анализ ведется аналогично акселерометрам с 2π -АВБС.

Несомненно, устранение коллизий является важным фактором повышения точности измерения вибрационных сигналов, однако, вызывает и дополнительные осложнения конструкции акселерометра: увеличение числа узкополосных микроволновых фильтров, обеспечение работы акселерометров на пропускание АВБС, особенно в массиве, требующее множества оптических волокон, необходимость применения АЧХ фильтров со сложными наклонными или более сложными, например, «двугорбыми» характеристиками.

Предложенная в [39] двухкомпонентная волновая АВБС комбинированного типа работает только на отражение. В отличие от ВБР, наличие в структуре $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС компоненты с фазовым π -сдвигом предположительно позволит избавиться от снижения точности измерения, вызванной достаточно широкой полосой отражения ВБР-компоненты. Фактически $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС относится к трехкомпонентным, для которых характерна устойчивость, к рассмотренным ранее коллизиям. Применение компоненты с фазовым π -сдвигом позволит применить и узкополосный фотоприемник, что позволит снизить стоимость акселерометра. Этому же будет способствовать простота организации работы по массиву акселерометров в топологии «точка-многоточка». Применение анализа полного массива сигналов для 3π - или 3λ -АВБС, рассмотренное в [40-44], позволит упростить алгоритмическую основу и программное обеспечение для их обработки. 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 как на отражение, так и на пропускание, что было рассмотрено в [45].

3 Структурные схемы для квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП

Для реализации квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП, можно использовать радифотонный метод реализованный на основе фотонных методов микроволновых преобразований сдвига центральной длины волны компонент последовательности $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в оптической области в изменение частоты микроволнового сигнала в электрической области [45].

Обеспечение высокой скорости опроса чувствительных элементов акселерометров, при использовании рассматриваемого метода, достигается за счет использования блока радиофотонного адресного интеррогатора (РФАИ) и цифровой обработки сигналов, позволяющий обнаружить частоту микроволнового сигнала с высокой скоростью [46, 47].

На рис. 7 представлена функциональная схема метода опроса $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС акселерометров-отражения с использованием широкополосного лазерного излучения с полосой излучения, равной максимальному хождению АВБС акселерометров в силу изменения температуры, которые существенно превышают отклик вибраций (около 10 нм).

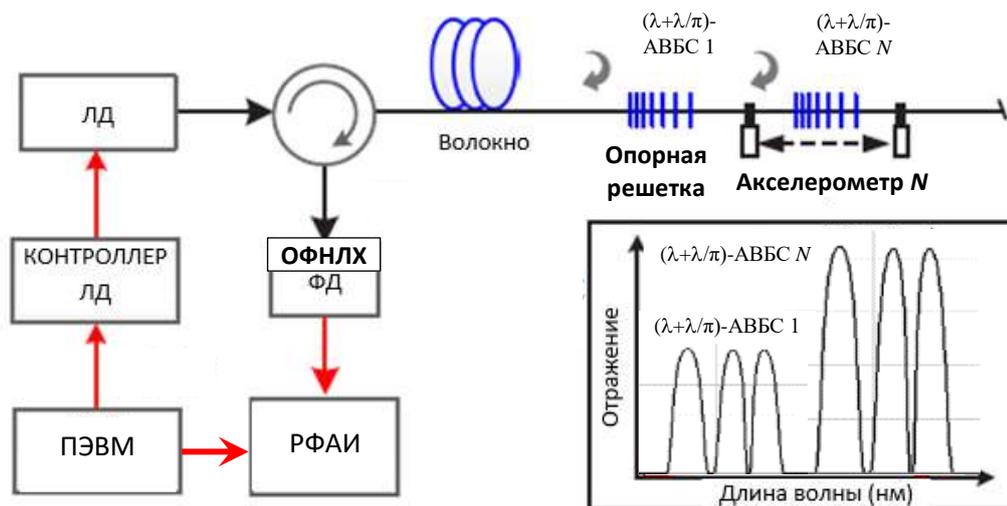


Рис. 7. Функциональная схема радиофотонной системы мониторинга на акселерометрах-отражения: ЛД – лазерный диод; ОФНЛХ – оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой; ФД – фотодетектор; ПЭВМ – управляющий компьютер; РФАИ – радиофотонный адресный интеррогатор

В данном методе опроса первая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС 1 используется в качестве чувствительного элемента опорного датчика для контроля мощности лазера и его стабильности. Вторая и последующие $N-1$ $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС используются в качестве чувствительных элементов. Каждая из них отличается увеличением коэффициента отражения с увеличением номера и уникальными адресами между компонентами $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС.

Отражение лазерного излучения от всех $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС приводит к формированию отраженных сигналов с разными расстояниями между частотными компонентами и разными их амплитудами, которые далее поступают на ФД через дисперсионный элемент ОФНЛХ. На фотодетекторе генерируется микроволновый сигнал биений с частотами, пропорциональными адресным.

Физическое воздействие, прикладываемое к чувствительному элементу волоконно-оптического датчика, оценивается за счет измерения амплитуд и частот сигналов биений.

На рис. 8 представлена функциональная схема метода опроса $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС акселерометров-пропускания также с использованием широкополосного лазерного излучения с полосой излучения, равной максимальному хождению АВБС акселерометров в силу изменения температуры, которые существенно превышают отклик вибраций (около 10 нм).

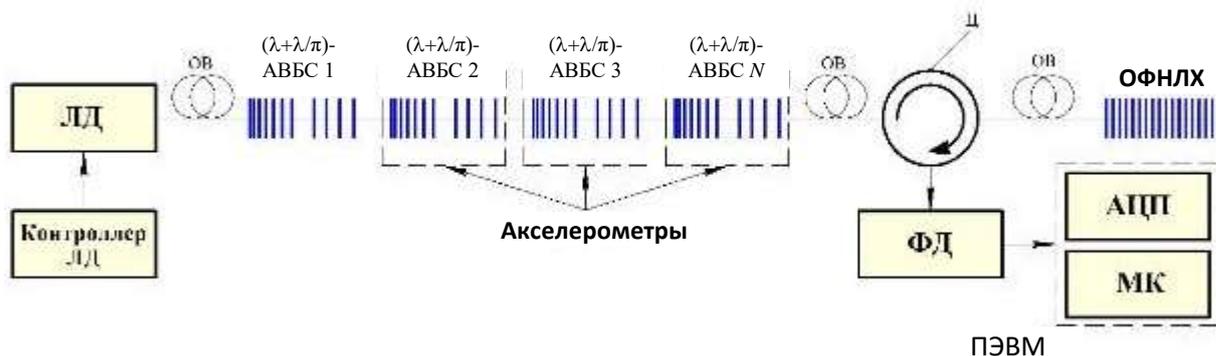


Рис. 8. Функциональная схема радиофотонной системы мониторинга на акселерометрах-пропускания: Ц – циркулятор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК - микроконтроллер

Число последовательно соединенных акселерометров будет зависеть от коэффициентов отражения компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС. Как вариант на рис. 9 показаны вариации λ/π компоненты при ее разной длине и заданном наведенном коэффициенте преломления волокна ($L_\lambda=L_1 < L_2 < L_3$).

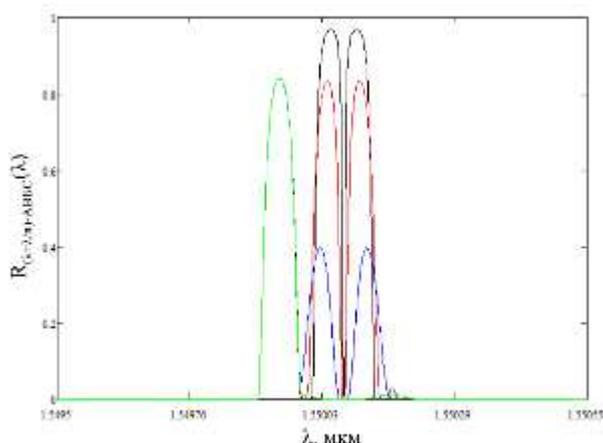


Рис. 9. Спектры компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении длины λ/π -ВБР ($L_1 < L_2 < L_3$): L_λ (зеленая линия); L_1 (синяя линия); L_2 (красная линия); L_3 (черная линия)

На рис. 10 представлен вариант, когда компоненты $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС записаны при различных значениях величины наведенного показателя преломления.

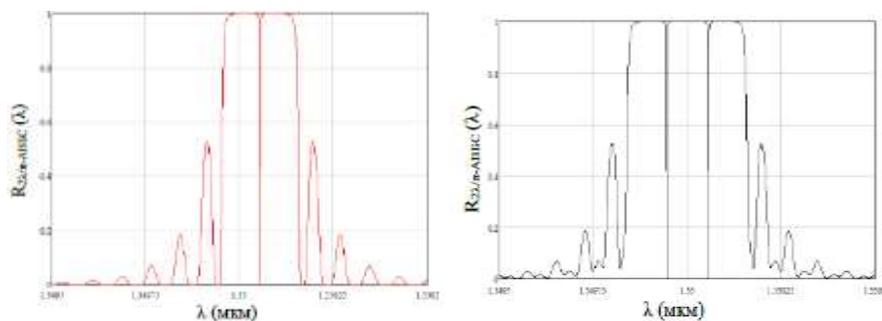


Рис. 10. Спектры компонент $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС при изменении наведенного показателя преломления: λ/π -ВБР компонента (а); дописанная к ней слева λ -ВБР компонента

Таким образом, при создании систем квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП в случае появления утечек выбор типа чувствительного элемента становится более сложной задачей. Однако ее решения могут быть найдены. В заключении данного раздела надо отметить, что мы рассматривали последовательность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС для одного волокна акселерометра, чтобы не усложнять представление материала.

Общей проблемой предложенных систем являются перекрестная чувствительность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС к температуре. Следовательно, в их структуре должен находиться узел компенсации температуры. Как правило, компенсация температуры осуществляется последовательной установкой дополнительного датчика в любом, наиболее приемлемом месте этой последовательности, но, как правило, в начале после лазера. На рис. 7 и рис. 8 представлены функциональные схемы радиофотонных систем мониторинга на акселерометрах-отражения/пропускания первая $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в качестве опорной для компенсации ухода лазера, но может быть использована и для компенсации температуры. Для этого в определенные периоды времени должна проводиться калибровка по температуре между ней и АВБС акселерометров при знании априори об отсутствии утечек на участке мониторинга ТП.

Заключение

Приведены постановки и предложены варианты решения задачи анализа существующих методов и средств контроля вибрации, вызванных утечками, основанных на использовании в них чувствительных элементов типа волоконной брэгговской решетки (ВБР), как наиболее перспективных: устойчивых к электромагнитным помехам и имеющих оптомеханику, работоспособную в широком диапазоне температур. По результатам анализа принято решение о влиянии чувствительного элемента на метрологические и технико-экономические характеристики акселерометра в целом, и в частности, на характеристики, определяющие его конструкцию.

Выбраны комбинированные волновые и фазо-волновые АВБС как наиболее перспективные чувствительные элементы для построения радиофотонных систем мониторинга на акселерометрах-пропускания (вариант 1) и акселерометрах-отражения (вариант 2). Решение подобных задач как на отражение, так и на пропускание невозможно при построении аналогичных систем на основе других некомбинированных типов.

Полученные решения позволяют судить о возможности измерений в таких системах по наличию составляющих биений между адресными компонентами встречно включенных $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС в структуре одного акселерометра. Дополнительными к адресному признаку являются коэффициенты отражения АВБС и ширина их полосы отражения или окна прозрачности, которые могут изменяться за счет изменения их физических длин при записи и наведенного коэффициента преломления волокна. Таким образом, при создании систем квазираспределенного непрерывного мониторинга вибраций ТП в случае появления утечек выбор типа чувствительного элемента становится более сложной задачей. Однако ее решения могут быть найдены.

Общей проблемой предложенных систем являются перекрестная чувствительность $(\lambda+\lambda/\pi)$ -АВБС к температуре. Следовательно, в их структуре должен находиться узел компенсации температуры. Как правило, компенсация температуры осуществляется последовательной установкой дополнительного датчика в любом, наиболее приемлемом месте этой последовательности, но, как правило, в начале после лазера. Кроме того, условиях инерционных процессов изменения температуры на несколько порядков выше, чем в задачах мгновенного изменения частоты вибраций.

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

Список литературы

1. Chamran M. K. A Non-Invasive Air-Coupled V-Type Ultrasonic Leak Detection System / M. K. Chamran and S. Shae // *Journal of Purity, Utility Reaction and Environment*. – 2015. – V.4. - P.99-107.
2. Almeida F. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: An experimental investigation / F. Almeida, M. Brennan, P. Joseph et al. // *Sensors*. – 2014. - V. 14, no. 3. - P. 5595-5610.
3. Duan H.-F. Leak detection in complex series pipelines by using the system frequency response method/ H.-F. Duan, P. J. Lee, M. S. Ghidaoui et al. // *Journal Hydraulic Research*. - V. 49, no. 2. - P. 213-221. DOI:10.1080/00221686.2011.553486.
4. Ghazali M. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks / M. Ghazali, S. B. M. Beck, J. D. Shucksmith, et al.// *Mechanical Systems Signal Processing*. – 2012. - V. 29, P. 187-200.
5. Ghazali M. F. Leak detection using instantaneous frequency analysis. Ph. D. dissertation, Univ. Shefeld, Shefeld, U.K., 2012.
6. Ghazali F. Instantaneous phase and frequency for the detection of leaks and features in a pipeline system / F. Ghazali, W. J. Staszewski, J. D. Shucksmith et al. / *Structural Health Monitoring*. – 2010. - V. 10, no. 4, P. 351-360.
7. Wang X.-J. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients / X.-J. Wang, M. F. Lambert, A. R. Simpson et al. // *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*. - 2002. - V. 128, no. 7, P. 697-711, 2002, doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(2002)128:7(697).
8. Hester J. Enabling sustainable sensing in adverse environments /J. Hester, T. King, A. Propst, K. Piratla et al. // in *Proc. IEEE Int. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, Jun. 2013. - P. 249251. DOI:[10.1109/SAHCN.2013.6644989](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2013.6644989)
9. Hester J. Enabling sustainable water distribution networks through sensor-based monitoring / J. Hester, T. King, A. Propst // *Tech. Rep.*
10. Shinozuka M., Nondestructive monitoring of a pipe network using a MEMS-based wireless network / M. Shinozuka, Pai H. Chou, Sehwan Kim et al.// *Proc. SPIE*. – 2020. - V. 7649, Art. no. 76490P, DOI:10.1117/12.848808.
11. Shinozuka M. Non-invasive acceleration-based methodology for damage detection and assessment of water distribution system / M. Shinozuka, D. Karmakar, P. H. Chou, et al. // *Smart Structures and Systems*. - 2010. - V.6, no. 10. - P. 545-559, 2010.
12. Hunaidi O. Leak detection methods for plastic water distribution pipes / O. Hunaidi, W. T. Chu, A. Wang, and W. Guan // *Nat. Res. Council Canada, Winnipeg, MB, Canada, Tech. Rep.* - 2000, P. 249-270.
13. Srirangarajan S. Wavelet-based burst event detection and localization in water distribution Systems / S. Srirangarajan, M. Allen, A. Preis et al. // *Journal Signal Processing System*. – 2013. - V. 72. – N.1. - P. 116.
14. Au-Yang M. K. Flow-induced vibration test of an advanced water reactor model Part 1: turbulence-induced forcing function / M. K. Au-Yang, B. Brennen, and D. Raj // *Nuclear Engineering and Design* /1995. - V. 157. - №.12. - P. 93-109.
15. Lu, Y. Damage monitoring of reinforced concrete frames under seismic loading using cement-based piezoelectric sensor / Y. Lu, Z. Li, W.I. Liao // *Materials and Structures*. – 2011. - V.44. – P. 1273–1285.
16. Jackson D.A. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network / D.A. Jackson, A.L. Ribeiro, L. Reekie at all. // *Optics Letters* – 1993. – 18. – P. 1192–1194.
17. Berkoff T. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer / T. Berkoff, A. Kersey // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1996. – V.8. – P.1677–1679.

18. Spero R.E. The Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) / R.E. Spero, S.E. Whitcomb // Opt. Photonics New. - 1995. – V.6. – P. 35–39.
19. Gutiérrez, N. Low weight additive manufacturing FBG accelerometer: Design, characterization and testing / N. Gutiérrez, P. Galvin, F. Lasagni // Measurement. – 2018. – V.117. – P. 295–303.
20. Xiao, X. Sensitivity-Tunable Oscillator-Accelerometer Based on Optical Fiber Bragg Grating / X. Xiao, J. Tao, Q. Song, Y. Sun, J. Yang, Z. Yan // Photonics. – 2021. – V.8. – P. 223. <https://doi.org/10.3390/photonics8060223>
21. Reghuprasad, A.E. Serially Connected Cantilever Beam-Based FBG Accelerometers: Design, Optimization and Testing / A.E. Reghuprasad, C. Colombero, A. Godio // Sensors. – 2023. – V. 23. –P. 3188, <https://doi.org/10.3390/s23063188>
22. Li Z. A Medium-Frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Flexible Hinges/ Z. Li, L. Liang, H. Wang, et all. – 2021. – Sensors. – 21. – P.6968. <https://doi.org/10.3390/s21216968>
23. Antunes P. Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity / P. Antunes, H. Varum, P. Andre // Measurement. - 2011. – V. 44. – P. 55-59.
24. Csipkes F.A. The Maturing of Optical Sensing Technology for Commercial Applications / F.A. Csipkes et all. // Micron Optics Inc., 2005.
25. Antunes P. Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres / P. Antunes et all. // Microwave and Optical Technology Letters. - 2008. - V.50. – Is.9. – P. 2467-2469.
26. Sakhabutdinov A. Zh. Fiber-optic acceleration sensor on duplex fiber Bragg structures / A.Zh. Sakhabutdinov, V.V. Chistyakov, O.G. Morozov et all. // Journal of Computational and Engineering Mathematics. - 2018. -Т. 5. - № 4.- С. 16-32.
27. Сахабутдинов А.Ж. Радиофотонный дифференциальный акселерометр на двух адресных волоконных брэгговских решетках / А.Ж. Сахабутдинов, В.В. Пуртов, О.Г. и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 5 (157). - С. 7-15.
28. Мисбахов Р.Ш. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплексных распределительных устройствах /Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2019. - Т. 15. - № 3. - С. 101-110.
29. Липатников К.А. Волоконно-оптический датчик вибрации "ВИБ-А" / К.А. Липатников, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев et all. // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 4 (51). - С. 26.
30. Kersey A.D. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection, A.D. Kersey, T.A. Berkoff, W.W. Morey, Optics Letters 18 (1) (1993) 72-74.
31. Kersey A.D. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter / A.D. Kersey, T.A. W.W. Berkoff / Morey Optics Letters. – 1993. – V. 18 (16). – P. 1370-1372.
32. Jackson D.A. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network / D.A. Jackson et all. // Optics Letters. – 1993. V.18 (14). – P. 1192-1194.
33. Volanthen M. Simultaneous monitoring of multiple fibre gratings with a single acousto-optic tunable filter / M. Volanthen et all. // Electronics Letters. – 1996. - 32 (13). - P.1228-1229.
34. Jung J. Novel interrogation system for dynamic strain measurement based on fiber Bragg grating sensor using long period grating pair and EDF / J. Jung, Y.W. Lee, B. Lee// in: Leos 2000 - IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. – 2000. - V.1. - P. 679-680.

35. Zhang L. Large-dynamic-range and high-resolution from a strain sensing system using long-period grating interrogating FBG strain sensor / L. Zhang et al. // in: 24th European Conference on Optical Communication. – 1998. - V.1. - P. 609-610.
36. Zhao D.H. Sensor interrogation technique using chirped fibre grating based Sagnac loop / D.H. Zhao et al. // Electronics Letters. – 2002. - 38 (7). – P. 312- 313.
37. Jiang Y. Four-element fiber Bragg grating acceleration sensor array / Y. Jiang // Optics and Lasers in Engineering. – 2008. – V. 46 (9). – P. 695-703.
38. Antunes P.F.C. et al., Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring / P.F.C. Antunes et al. // Sensors Journal, IEEE. – 2009. - Antunes P.F.C. et al., V. 9 (11). – P. 1347-1354.
39. Мисбахов Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Мисбахов Р.Ш., Артемьев В.И., Морозов О.Г. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2024. - № 2 (62). - С. 57-73.
40. 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.
41. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С. 535-543.
42. 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.
43. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. - 2020. - Т. 6. - № 1. - С. 6–13.
44. 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.
45. Сахабутдинов А.Ж. Иерархический классификатор задач построения радиофотонных сенсорных систем на основе адресных волоконных брэгговских структур / А.Ж. Сахабутдинов // Инженерный вестник Дона. - 2018. - № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5141.
46. Муслимов Э.Р. Спектрографы с высокой дисперсией для радиофотонных сенсорных систем / Э.Р. Муслимов, И.И. Нуреев, О.Г. Морозов и др. // Фотон-экспресс. - 2019. - № 6 (158). - С. 318-319.
47. 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. -P. 125104.

SELECTION OF DESIGN AND SENSORS OF FIBER-OPTIC ACCELEROMETERS FOR PIPELINE LEAK MONITORING

Rus.Sh. Misbakhov^{1,3}, E.V. Kulikov²

¹ LLC "TatAISneft"

62, st. Riza Fakhretdina, Almetyevsk, 423458, Russian Federation

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

10, Pogonny proezd, Moscow, 107564, Russian Federation

³ Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev-KAI (Almetyevsk branch)

10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The developed method of monitoring pipeline (PL) leaks involves the use of a number of fiber-optic accelerometers installed along the PL for continuous quasi-distributed monitoring of its dynamic behavior. To select the design of a fiber-optic accelerometer, the task was set to analyze the existing methods and means of monitoring vibration caused by leaks, based on the use of sensitive elements of the fiber Bragg grating (FBG) type, as the most promising: resistant to electromagnetic interference and having optomechanics operating in a wide range of temperatures. Based on the analysis results, it is possible to make a decision on the influence of the sensitive element on the metrological and technical and economic characteristics of the accelerometer as a whole, and in particular, on the characteristics determining its design. The general formulation of the analysis problem can be divided into three main parts: the possibility of leak detection (sensitivity), spatial characteristics of the analysis - resistance to transverse and arbitrary effects different from axial ones, and, finally, the implementation of the accelerometer operating point control function. Based on the analysis results, a uniaxial accelerometer with two parallel fibers was selected according to the specified criteria, into which one FBG is built in before and after the inertial mass. During the analysis, attention was paid to the transition from optoelectronic methods of accelerometer interrogation to microwave photonic ones. The possibility of such a solution is confirmed by the use in the accelerometer of a new type of sensitive element instead of FBG - an addressable fiber Bragg structure (AFBS) of wave – or phase π with one address, as well as their multi-address versions $N\lambda$ and $N\pi$. To interrogate the AFBS, an addressable microwave photonic interrogator should be built, which is significantly cheaper in terms of the mass-dimensional parameters of the size, weight, cost and power consumption, compared to the optoelectronic one, and also better in terms of metrological and technical-economic characteristics. In the development of this type of accelerometers, the paper proposes the use of new AFBS of a combined type - $(\lambda+\lambda/\pi)$ -AFBS, the main address frequency of which is not clearly expressed, i.e. cannot be determined by measurements only for transmission or only for reflection. This confirms the possibility of constructing lines of quasi-distributed accelerometers or their arrays of complex PL topology, which is difficult to implement when using single- and multi-address AFBS that do not allow combined inclusion.

Keywords: pipeline, leak, accelerometer, fiber Bragg grating, single-address fiber Bragg structure, multi-address fiber Bragg structure, combined address fiber Bragg structure, generalized structural diagram.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024