

© Вахрамеев П. С., Вахрамеев Д. В., Максимов А. В.,
Харахнин К. А., Терешин Д. А., 2019

Вахрамеев Павел Сергеевич

Руководитель инжинирингового центра
«Компьютерное моделирование
технологических процессов и
систем» РНТЦ,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: vakhrameev_ps@mail.ru

Vakhrameev Pavel Sergeevich

Head of Engineering Center
“Computer simulation of technological
processes and systems”,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: vakhrameev_ps@mail.ru

Вахрамеев Дмитрий Валерьевич

Инженер,
ЗАО НПЦ «Наука-сервис»
(Череповец, Россия)
E-mail: reader77@yandex.ru

Vakhrameev Dmitry Valerevich

Engineer,
ZAO NPTS “Nauka-servis”
(Череповец, Россия)
E-mail: reader77@yandex.ru

Максимов Андрей Владимирович

Доктор физико-математических наук,
профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: a_v_maximov@mail.ru

Maksimov Andrey Vladimirovich

Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: a_v_maximov@mail.ru

Харахнин Константин Аркадьевич

Кандидат технических наук,
доцент, советник при ректорате,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: kakharakhnin@chsu.ru

Kharakhnin Konstantin Arkadevich

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor,
Advisor to the university administration,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: kakharakhnin@chsu.ru

Терешин Денис Альбертович

Магистрант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: xengedenis@yandex.ru

Tereshin Denis Albertovich

Student in the master’s programme,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: xengedenis@yandex.ru

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
РЕШЕТКИ**

**REAL-TIME SURFACE MONITORING
SYSTEM BASED ON FIBER OPTIC
GRATING**

Аннотация. В статье рассматривается устройство для мониторинга целостных характеристик длинномерных объектов, предназначенное для определения механических деформаций и разрушений на таких

Abstract. The article focuses on the principle of the device for monitoring the integral characteristics of long objects. The device is intended to be used to identify the mechanical deformations in such constructions

конструкциях, как трубопроводы, тепло-трассы, газопроводы, напольные покрытия и прочие объекты, длина которых может составлять десятки километров. В качестве основного чувствительного элемента выступает оптическое волокно. Увеличение точности детектирования достигается за счет перекрестной укладки оптоволокон с максимальным удалением перекрещивающихся участков друг от друга. Оптоволоконную линию можно использовать как датчик деформации или температуры.

Ключевые слова: оптическое волокно, датчик механической деформации, рефлектометрия

as pipelines, heat pipelines, gas pipelines, floor coverings and other objects, the length of which can be about tens of kilometers. Optical fiber is considered to be the main sensing element. The increase of detection accuracy is achieved by cross-laying fiber with the maximum distance of intersecting areas from each other. The fiber optic line can be used as a deformation or temperature sensor.

Keywords: optical fiber, mechanical strain gauge, reflectometry

Введение

Датчики на основе оптоволокон находят широкое применение в современных системах безопасности¹, так как внешние воздействия, такие как механическое давление, деформации или вибрации, изменяют параметры волокна и, как следствие, характеристики проходящего через него излучения. В волоконно-оптических системах используются несколько методов регистрации сигналов воздействия:

1. Метод регистрации межмодовой интерференции².

В данном методе полупроводниковый лазер обычно генерирует несколько десятков близких по частоте мод (спектральных линий) с определенным распределением энергии по спектру излучения. Если оптоволоконный кабель подвергается механическим воздействиям, то на его выходе спектр излучения претерпевает изменения вследствие межмодовой интерференции, что позволяет обнаруживать деформации или вибрации кабеля.

2. Метод регистрации спекл-структуры³.

¹ См. об этом: Горшков Б. Г., Заирный М. В., Кулаков А. Т. Патент РФ № 2271446. МПК E21B47/00, G01N9/00. Устройство для мониторинга виброакустической характеристики протяженного объекта / заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «ПетроЛайт». № 2004122690/28; заявл. 27.07.04, опублик. 10.03.2006; Хабаров Д. Н. Повышение эффективности обеспечения безопасности территориально-распределенных объектов волоконно-оптическими системами охраны периметра // Инновационное развитие экономики: проблемы и перспективы: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Рязань, 5 апреля 2012). – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, 2012. – С. 165–167.

² Маринин А. В., Маринина Л. А. Физические принципы чувствительных элементов датчиков охранных систем // Современные информационные технологии: труды Международной научно-технической конференции. – Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2011. – Вып. 14. – С. 203–204.

³ Максимова Л. А., Мысина Н. Ю., Гребенюк А. А., Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П. Метод цифровой лазерной спекл-фотографии для измерения микроперемещений рассеивающих объ-

В данном методе на выходе многомодового оптоволокна наблюдается так называемая «спекл-структура», представляющая собой нерегулярную систему светлых и темных пятен. При деформациях или вибрациях волокна спекл-структура изменяется. Для детектирования деформаций кабеля применяют пространственно-чувствительные фотоприемники.

3. Интерференционный метод¹.

Этот метод основан на принципе двухлучевой интерферометрии. Луч лазера расщепляется на два луча, которые направляются в два идентичных одномодовых оптических волокна. На приемном конце оба луча создают интерференционную картину. Механические воздействия на чувствительный кабель приводят к изменениям интерференционной картины, которые и регистрируются фотоприемником. Для локализации области воздействия применяется технология сравнения этих сигналов в обоих плечах интерферометра, обеспечивающая точность локализации до нескольких десятков метров на участке порядка 8–10 км.

Для отслеживания изменения статических деформаций и измерения динамических деформаций используется диагностическая система, которая включает перестраиваемый узкополосный источник светового излучения, светопроводящее волокно, отражательные датчики (например, по типу решеток Брэгга), расположенные по длине волокна, и контур обработки сигнала. Эта система может применяться также по схеме Фабри-Перо, поэтому она обеспечивает высокую чувствительность к деформациям, но является очень сложной и обладает малой пространственной разрешающей способностью².

Другой тип устройств для мониторинга виброакустической характеристики протяженного объекта содержит узкополосный импульсный источник оптического излучения в виде волоконного лазера с модуляцией добротности, чувствительный элемент в виде оптического волокна, расположенного продольно внутри или снаружи протяженного объекта, а также включает узел ввода оптического излучения в чувствительный элемент, фотоприемник и узел обработки сигнала с процессором³.

Наличие случайных вариаций несущей частоты тестирующих оптических импульсов, вводимых в волокно, связанных с импульсным режимом работы лазера и чувствительностью волоконного лазера к техническим шумам, является одним из недостатков таких систем контроля. Он ограничивает дальность действия, чувствительность и разрешающую способность устройства, а также затрудняет его использование в полевых условиях.

ектов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2011. – Т. 11. – Вып. 2. – С. 149–153.

¹ Кузнецов М. М., Носков М. Ф. Двухлучевой интерферометр повышенной чувствительности для регистрации сверхмалых подвижек тектонических плит // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 58–61.

² Гетманов В. Г., Жужжалов В. Е., Тертышный Г. Г. Патент РФ № 2228518 / кл. G01M7. Диагностическая измерительная система, опубл. 2004.

³ Горшков Б. Г., Заирный М. В., Кулаков А. Т. Патент РФ № 2271446. МПК E21B47/00, G01H9/00. Устройство для мониторинга виброакустической характеристики протяженного объекта / заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «ПетроЛайт». № 2004122690/28; заявл. 27.07.04, опубл. 10.03.2006.

Общим недостатком перечисленных устройств является нечувствительность датчиков к статическим и низкочастотным внешним воздействиям вследствие принципа функционирования интерферометров. Кроме того, для построения волоконной системы принципиально необходимо замыкать волоконный контур в кольцо, что требует физического доступа к удаленному концу волоконной линии и оптического присоединения его к оптическому входу / выходу – направленному ответвителю в оптоэлектронном блоке.

Цель данной работы – разработать установку, на которой можно протестировать способ детектирования деформации протяженного объекта с использованием вышеупомянутого метода регистрации межмодовой интерференции. Эта установка должна позволить использовать оптическое волокно в качестве датчика, установить пределы точности измерения, а в дальнейшем определить лучший способ совмещения контрольной сетки и контролируемой поверхности.

Основная часть

Экспериментальная часть

Система контроля поверхности дальномерных объектов, разработанная в этой работе, показана на рис. 1. Она содержит непрерывный полупроводниковый лазер, модулятор, предназначенный для формирования периодической последовательности прямоугольных импульсов из оптического сигнала, волоконно-оптическую измерительную линию на одномодовом оптическом волокне (как чувствительный элемент), узел ввода оптического излучения в чувствительный элемент и узел вывода рассеянного излучения, фотоприемник, необходимый для преобразования рассеянного оптического излучения в электрический сигнал, а также узел с процессором для обработки сигнала. В качестве датчиков сигналов в данной системе используются линейные отрезки волокна, находящиеся на деформируемой поверхности объекта.

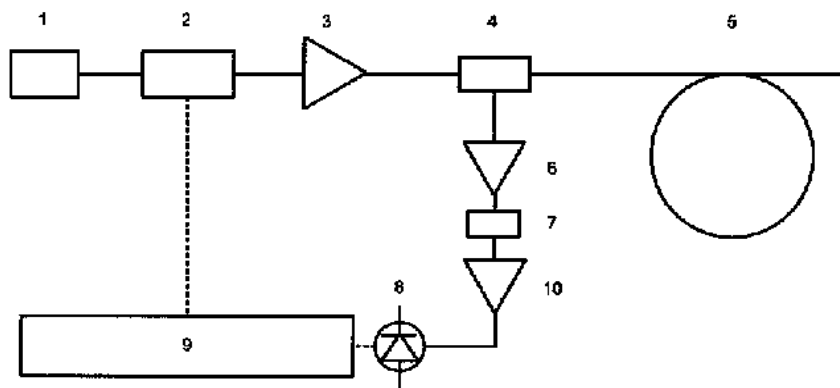


Рис. 1. Система контроля поверхности дальномерных объектов: 1 – непрерывный лазер, 2 – модулятор, 3 – усилитель мощности, 4 – узел ввода излучения, 5 – чувствительный элемент на контролируемом объекте, 6 – предварительный усилитель, 7 – фильтр, 8 – фотоприемник, 9 – узел обработки сигнала с процессором, 10 – оптический усилитель

Система контроля поверхности дальномерных объектов работает следующим образом. Излучение лазера 1 с непрерывным узкополосным спектром поступает на акустооптический модулятор 2, вырезающий из него короткие импульсы прямоугольной формы, которые далее усиливаются в усилителе мощности 3 и через узел ввода оптического излучения 4 поступают на чувствительный элемент 5 – оптический кабель, расположенный внутри или рядом с контролируемым объектом.

В участках оптического волокна, размещенных на неподвижных неоднородностях, происходит рэлеевское рассеивание излучения (без изменения частоты). Отраженное от возникающих неоднородностей (либо от конца оптического волокна) рассеянное излучение поступает через узел 4 на оптический предварительный усилитель 6 и после усиления в нем попадает на узкополосный оптический фильтр 7, после которого излучение направляется на фотоприемник 8 и преобразуется в электрический сигнал, поступающий на анализ в узел обработки сигнала с процессором 9.

Устройство для мониторинга целостных характеристик длинномерного объекта имеет непрерывный волновод, который уложен на поверхности особым образом в виде пересекающихся линий, что позволяет увеличить точность детектирования сигнала.

Данная система контроля предназначена для неразрушающего мониторинга длинномерных объектов и обнаружения механических деформаций или регистрации движения внешних объектов (людей, механизмов и др.) вблизи чувствительного элемента устройства. Кроме того, она может быть использована для контроля целостности и охраны длинномерных объектов, мониторинга периметров и коммуникаций, в частности для отслеживания состояния транспортных трубопроводов и проведения работ вблизи кабеля, а также защиты периметров важных объектов.

Для повышения точности в данной системе контроля поверхности в режиме реального времени на основе волоконной оптической решетки используется метод обратного рассеяния. Этот метод основан на введении в волокно импульсного оптического излучения и последующем анализе малой части светового потока, которая возвращается на приемник в результате обратного рассеяния и отражений распространяющейся в волокне световой волны. Определение пространственных координат неоднородностей осуществляется по итогам измерения интервала времени между моментом послышки зондирующего импульса и регистрацией импульса обратно рассеянной мощности.

Повышение точности вычисления места расположения неоднородности (места срабатывания датчика) в данной системе контроля выполняется за счет перекрестной укладки оптоволоконных линий с максимальным удалением перекрещивающихся участков друг от друга.

Результаты измерений

Перед началом эксплуатации необходимо провести калибровку, так как предельные характеристики системы будут зависеть от используемой модели рефлектометра.

В данной системе каждой контрольной точке соответствуют n событий на рефлектограмме (где n – количество оптоволоконных линий в точке, $n_{\min}=2$). В результате формируется рефлектограмма, которую по совокупности характеристик легко

однозначно сопоставить с каждой конкретной точкой контроля поверхности объекта. При импульсном возбуждении чувствительного элемента (участка оптоволокна) временная зависимость уровня мощности сигнала обратного рассеяния имеет вид, близкий к экспоненте (см. рис. 2). Кривая обладает незначительными флуктуациями, вызванными погрешностью элементной базы средств измерения, и устраняется проведением серии измерений (порядка 700 измерений в секунду).

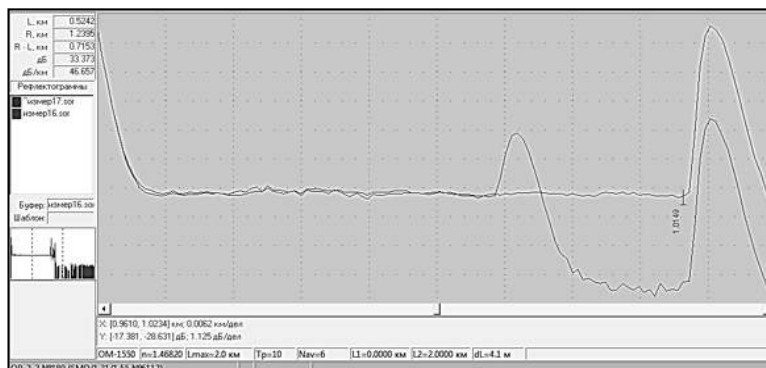


Рис. 2. Рефлектограмма на дисплее рефлектометра

В отсутствие виброакустических воздействий и изменений несущей частоты для прямоугольных тестирующих импульсов рефлектограммы от разных импульсов, полученные в различные моменты времени, совпадают. При наличии виброакустического воздействия на чувствительный элемент рефлектограммы от разных импульсов в области воздействия различны (см. рис. 2). Амплитуда изменений определяет интенсивность воздействия, а временная задержка относительно тестирующего прямоугольного импульса однозначно вычисляет координату воздействия. Характер и координату воздействия выявляет блок 9 (см. рис. 1) при помощи сравнения множества рефлектограмм путем определения мест их существенных изменений.

Рассмотрим подробнее принцип функционирования рабочего элемента оптоволоконного датчика (см. рис. 3).

Важно отметить, что изначально рабочий элемент проектировался с учетом мертвой зоны, которая неминуемо возникает вблизи отражающих неоднородностей – коннекторного соединения или срастков волокон. Это происходит по той причине, что мощность отраженных импульсов обычно значительно превышает мощность импульсов, рассеянных на релеевских центрах в волокне. Причем отражение от оптического разъема рефлектометра, как правило, приводит к насыщению фотоприемника, и поэтому мертвая зона в начале рефлектограммы получается наиболее широкой.

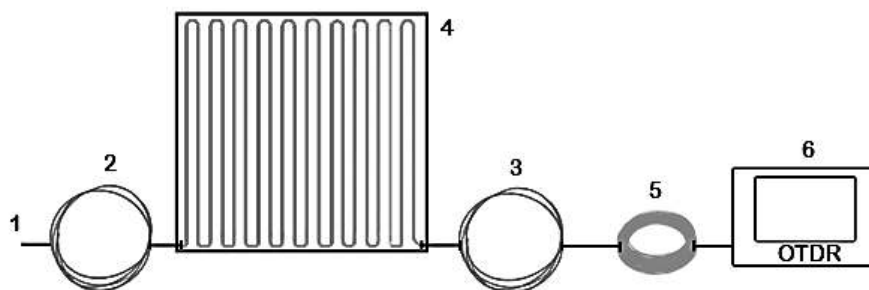


Рис. 3. Принцип функционирования рабочего элемента. 1 – конец линии, 2, 3 – компенсационные катушки длиной 20 м, 4 – рабочий элемент стенда, 5 – компенсационная катушка длиной 1000 м, 6 – рефлектометр

В данной работе актуальна важность учета мертвой зоны в силу малого рабочего участка, на котором нужно детектировать сигналы. Для этого используются специальные компенсационные (нормализующие) катушки. Применение такой нормализующей катушки позволяет оценить потери на первом соединителе линии (в данном случае коннекторе), кроме того, уменьшается опасность повреждения оптического разъема рефлектометра некачественными патч-кордами.

Для того чтобы компенсировать мертвую зону оптического рефлектометра, необходимо использовать компенсационные катушки, которые подключаются к рабочему элементу 4 с обеих сторон (см. рис. 3). Поскольку в данной работе рассматривается один элемент стенда, то в процессе по устранению мертвой зоны участвует только катушка 3. Чтобы приблизить результаты эксперимента к реальным линиям связи, была использована еще одна катушка 5. Это нормализующая одномодовая катушка длиной 1000 м.

В ходе исследования были проведены два измерения:

1. Измерение для проверки работоспособности первой вариации рабочего элемента стенда. На рефлектограмме оно отображено синей кривой (а) (см. рис. 4).
2. Измерение при внешнем воздействии на рабочий элемент стенда. На рефлектограмме оно отображено серой кривой (б) (см. рис. 4).

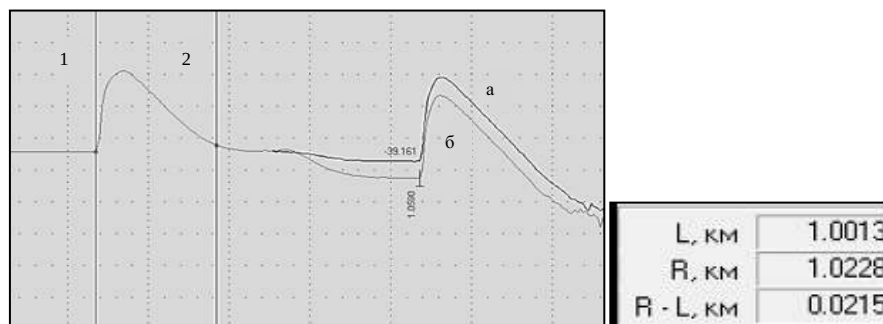


Рис. 4. Рефлектограмма рабочего элемента стенда с применением компенсационной катушки 3. Мертвая зона отмечена красным (1) и синим (2) маркерами

На рефлектограмме видно, что мертвая зона компенсирована катушкой 3 (см. рис. 3) и смещена на достаточное расстояние от рабочего диапазона. На достаточность рабочего диапазона указывает следующее: при воздействии на рабочий элемент стенда возможно визуально по рефлектограмме детектировать затухающий сигнал (серая кривая).

Дальнейшим этапом исследования стенда является использование специальных устройств (соединительных коннекторов) для компенсации мертвой зоны. На данном этапе соединительная компенсационная катушка 3 уже не нужна. Объясняется это тем, что она выполняет роль добавочного устройства для оттягивания мертвой зоны от рабочего диапазона. Основным недостатком этого решения является необходимость в каждом рабочем элементе стенда добавлять по две таких катушки на входе и выходе. Это создает неудобства и трудности при монтаже, а самое главное – данный вариант устранения мертвой зоны неэффективен, так как на 50 м рабочего диапазона необходимо использовать 20 м катушки, при этом даже такой длины не хватает для полной компенсации мертвой зоны.

Следовательно, решить возникающую проблему без использования компенсационных катушек из оптического волокна можно с помощью соединительных оптических коннекторов, которые наиболее эффективно справляются с мертвыми зонами.

Существует множество видов коннекторов, применяемых для соединения волокон, но важной особенностью каждого из них является тип полировки.

На рис. 5 приведены два типа рассматриваемых коннекторов.

В данной работе был выбран коннектор с типом полировки APC, так как световой пучок, проходя по волокну и попадая внутрь такого коннектора в результате многочисленных отражений от стенок волокна, направится в заостренный конец и пройдет дальше по линии. Этот вариант использования защищает рефлектометр от сильных засветов, которые характерны на коннекторных соединениях; следовательно, и длина мертвой зоны на рефлектограмме уменьшится или полностью скомпенсируется, т. е. участок будет иметь вид, как при сварном соединении или изгибе волокна.

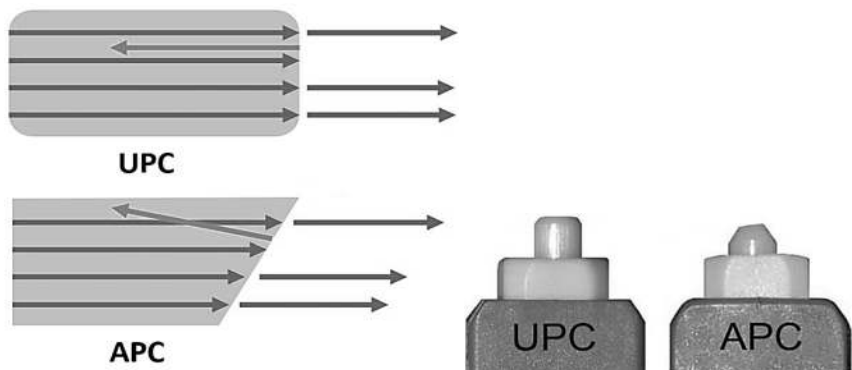


Рис. 5. Особенности коннекторных наконечников, рассматриваемых для соединения элементов стенда

Коннектор с типом полировки UPC в данной работе не применяется из-за сильного отражения светового пучка обратно в волокно, что приводит к нежелательным

последствиям. Например, часть сигнала, отраженная от наконечника с таким типом полировки, всегда уменьшает качество переданной информации. Кроме того, значительная засветка рефлектометра при использовании коннектора с полировкой UPC не дает положительного эффекта по сравнению с катушкой 3 (см. рис. 3), которая применялась ранее.

Подтвердим и покажем на рефлектограммах особенности выбора коннектора с полировкой APC в сопоставлении с UPC:

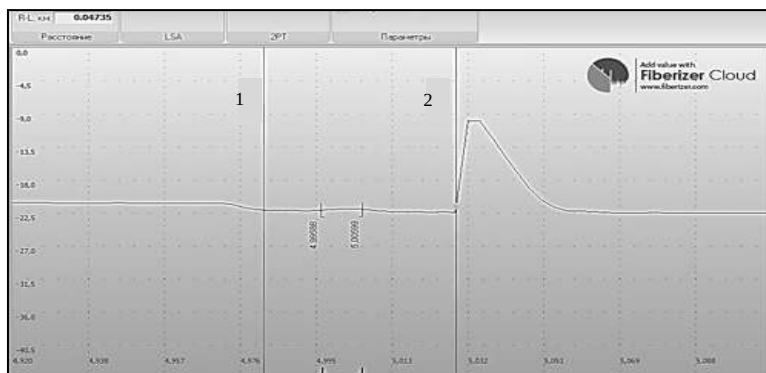


Рис. 6. Участок рефлектограммы рабочего элемента станда, где в качестве устройства для компенсации мертвой зоны рефлектометра применяется коннектор с типом полировки APC. Рабочий диапазон отмечен красным (1) и синим (2) маркерами

Как мы видим на рис. 6, коннектор с полировкой APC действительно компенсирует мертвую зону. На рефлектограмме это показано перегибом вблизи красного маркера (1). Пик, находящийся вблизи синего маркера (2), представляет собой коннектор с полировкой UPC.

Теперь, зная характер данного участка, можно предположить и длину рабочего диапазона, который, как было упомянуто ранее, должен составлять 50 м. Далее проводились измерения и наблюдения, необходимые для определения оптимальности выбора коннектора с полировкой APC.

На рис. 7 показана рефлектограмма с областью затухания сигнала. Отклонение красной кривой (а) свидетельствует о том, что на оптическое волокно, находящееся внутри рабочего элемента станда, было оказано внешнее воздействие.

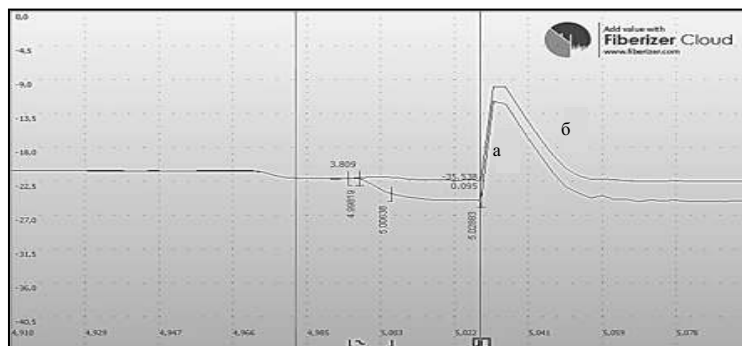


Рис. 7. Участок рефлектограммы рабочего элемента станда с областью затухания сигнала

На рис. 6 предполагаемый рабочий диапазон показан с помощью красного (1) и синего (2) маркеров. Визуальное определение начала отклонения красной кривой (а) говорит о том, что данный диапазон достаточен. Кроме того, длина волокна в рабочем элементе, равная 50 м, фактически полностью определяется в рабочем диапазоне. Подтверждается это в том числе с помощью автоматического измерения расстояния между маркерами (см. рис. 8). Следовательно, выбранный коннектор удовлетворяет поставленной задаче по определению оптимальных условий для использования оптического волокна как датчика в данном стенде.

Рис. 8. Окно программы для измерения расстояния выбранного участка по двум точкам.

L, км – красный маркер (1), R, км – синий маркер (2), R–L, км – расстояние участка между маркерами

В третьем поле (см. рис. 8) рассчитывается расстояние, показывающее, что рабочий диапазон почти полностью отображен на рефлектограмме при использовании коннектора с типом полировки APC.

Далее определяется интересующее значение затухания на рабочем участке. Для этого можно найти разницу между кривыми сигнала до и после деформации или использовать таблицу событий, содержащую информацию обо всех неоднородностях на рефлектограмме (см. рис. 9).

#	Тип	Расстояние	Затухание	Коэффициент о...	Суммарное за...
Коэффициент з...					
4	—	Участок волокна			
		1.25637 км	0.367 дБ	0.292 дБ/км	0.030 дБ
	↙	Сотражением			
		1.78372 км	0.004 дБ	-64.416 дБ	0.034 дБ
5	—	Участок волокна			
		3.21447 км	1.080 дБ	0.336 дБ/км	1.114 дБ
	↘	Затухание			
		4.99819 км	3.809 дБ		4.923 дБ
6	—	Участок волокна			
		0.03064 км	0.009 дБ	0.300 дБ/км	4.932 дБ
	↙	Сотражением			
		5.02883 км	0.095 дБ	-35.538 дБ	5.027 дБ

Рис. 9. Таблица событий, содержащая все типы неоднородностей на рефлектограмме

По таблице событий можно определить место взаимодействия оптического волокна, проложенного внутри рабочего элемента, с внешним воздействием, оказанным на данный элемент. Известно, что длина рабочего диапазона составляет 50 м, а длина участка, на котором детектируется затухание сигнала, – 30,64 м, следовательно, расстояние, на котором происходит деформация волокна из-за внешнего воздействия, равно 19,36 м. Величина затухания на исследуемом участке составляет 3,8 дБ. Суммарное затухание, накопленное к концу участка, равно 5 дБ.

Полученные в ходе данной работы значения подкрепляются сделанными ранее выводами о достаточности рабочего диапазона при его визуальном определении на рефлектограмме.

Можно сравнить результаты коннектора с типом полировки UPC, который подключается теперь перед коннектором с полировкой APC:

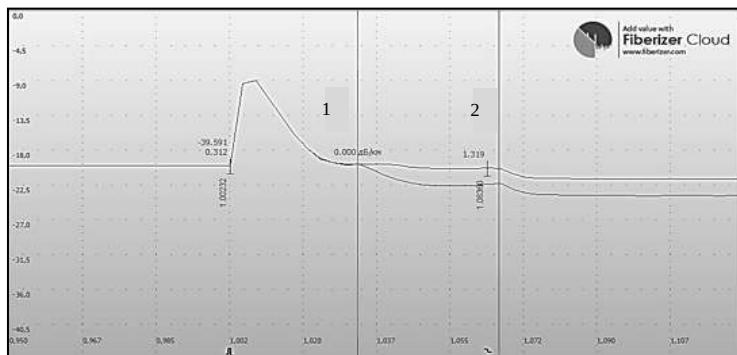


Рис. 10. Участок рефлектограммы рабочего элемента стенда, где в качестве устройства для компенсации мертвой зоны рефлектометра применяется коннектор с типом полировки UPC. Рабочий диапазон отмечен красным (1) и синим маркерами (2)

По рефлектограмме (см. рис. 10) видно, что коннектор такого типа нерационально применять в данной работе, так как он не компенсирует мертвую зону. Подтверждается этот вывод и шириной рабочего диапазона, отмеченного с помощью маркеров. Ширина диапазона недостаточна для полноценных измерений и составляет порядка 33 м по сравнению с длиной волокна, равной 50 м.

С учетом описанных ранее особенностей спроектируем итоговую версию рабочего элемента стенда (см. рис. 11).

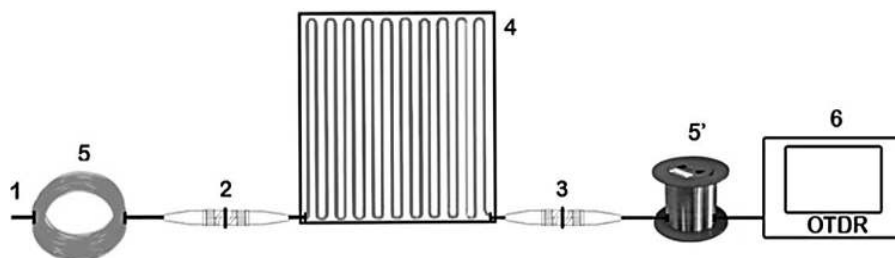


Рис. 11. Принцип функционирования итоговой версии рабочего элемента стенда: 1 – конец линии, 2, 3 – места соединений коннекторов с типом полировки APC, 4 – рабочий элемент стенда, 5, 5' – катушки с длинами 1 и 5 км, 6 – рефлектометр

Стоит отметить, что во время исследования стенда с использованием оптических коннекторов для более точной имитации реальной линии связи при детектировании затухания сигнала в дополнение к компенсационной катушке 5 длиной 1000 м была добавлена катушка длительностью 5 км.

Выводы

Достоинством данной системы контроля поверхности является то, что она работает в режиме реального времени на основе волоконной оптической решетки и не привязана к конкретной модели и типу рефлектометра.

В этой системе возможно повышение точности измерения и вычисления места расположения неоднородности (места срабатывания датчика) за счет перекрестной укладки оптоволоконна с максимальным удалением перекрещивающихся участков друг от друга.

Для того чтобы уменьшить занимаемое пространство, плоскую поверхность протяженного объекта в лабораторной установке (см. рис. 12) можно заменить на цилиндр, на который нанесен оптоволоконный кабель. Данное решение позволяет компактно смоделировать отрезок протяженного объекта для осуществления калибровки установки и проведения экспериментальных исследований. Свободные концы кабеля подключены к оптическому рефлектометру.

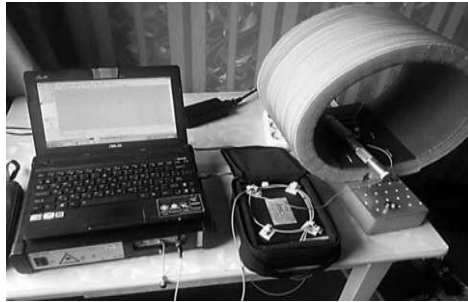


Рис. 12. Лабораторная установка

Были проведены измерения по обнаружению затухающего сигнала из-за деформации оптического волокна вследствие внешнего воздействия на рабочую область. Показано, что при правильном выборе устройств по согласованию перехода в точках соединения оптического волокна с помощью рефлектограмм можно определять место локализации деформаций в оптоволоконном кабеле, возникающих за счет давления, с точностью до полуметра.

Литература

Гетманов В. Г., Жужжалов В. Е., Тертышный Г. Г. Патент РФ № 2228518 / кл. G01M7. Диагностика измерительная система, опубл. 2004.

Горшков Б. Г., Заирный М. В., Кулаков А. Т. Патент РФ № 2271446. МПК E21B47/00, G01N9/00. Устройство для мониторинга виброакустической характеристики протяженного объекта / заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «ПетроЛайт». № 2004122690/28; заявл. 27.07.04, опубл. 10.03.2006.

Кузнецов М. М., Носков М. Ф. Двухлучевой интерферометр повышенной чувствительности для регистрации сверхмалых подвижек тектонических плит // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 58–61.

Максимова Л. А., Мысина Н. Ю., Гребенюк А. А., Горбатенко Б. Б., Рябухо В. П. Метод цифровой лазерной спекл-фотографии для измерения микроперемещений рассеивающих объектов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2011. – Т. 11. – Вып. 2. – С. 149–153.

Маринин А. В., Маринина Л. А. Физические принципы чувствительных элементов датчиков охранных систем // Современные информационные технологии: труды Международной научно-технической конференции. – Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2011. – Вып. 14. – С. 203–204.

Хабаров Д. Н. Повышение эффективности обеспечения безопасности территориально-распределенных объектов волоконно-оптическими системами охраны периметра // Инновационное развитие экономики: проблемы и перспективы: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Рязань, 5 апреля 2012). – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, 2012. – С. 165–167.

References

Getmanov V. G., Zhuzhzhakov V. E., Tertyshnyi G. G. *Patent RF № 2228518 / kl. G01M7. Diagnosticheskaya izmeritel'naya sistema, opubl. 2004* [Diagnostic measurement system. Patent № 2228518, Russian Federation, cl. G01M7, publ. 2004].

Gorshkov B. G., Zazirnyi M. V., Kulakov A. T. *Patent RF № 2271446. MPK E21B47/00, G01H9/00. Ustroystvo dlia monitoringa vibroakusticheskoi kharakteristiki protiazhennogo ob'ekta. zaivitel' i patentoobladatel': Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'iu "PetroLait". № 2004122690/28; zaivl. 27.07.04, opubl. 10.03.2006.* [Patent № 2271446, Russian Federation, IPC E21B47 / 00, G01H9 / 00. Device for monitoring the vibro-acoustic characteristics of an extended object. Applicant and patent holder: OOO PetroLight (Limited Liability Company). No. 2004122690/28; decl. 27.07.04, publ. 10.03.2006].

Kuznetsov M. M., Noskov M. F. Dvukhluchevoi interferometr povyshennoi chuvstvitel'nosti dlia registratsii sverkhmalykh podvizhek tektonicheskikh plit [A two-beam interferometer of increased sensitivity for recording ultra-small movements of tectonic plates]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the higher institutions. Mining Journal], 2007, no. 4, pp. 58–61.

Maksimova L. A., Mysina N. Iu., Grebeniuk A. A., Gorbatenko B. B., Riabukho V. P. Metod tsifrovoy lazernoy spekl-fotografii dlia izmereniia mikroperemeshchenii rasseivaiushchikh ob'ektov [Technique of digital laser speckle photography for measurement scattered object microdisplacements]. *Izvestiia Saratovskogo universiteta. Novaya seriia. Seriya: Fizika* [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics], 2011, vol. 11, iss. 2, pp. 149–153.

Marinin A. V., Marinina L. A. Fizicheskie printsipy chuvstvitel'nykh elementov datchikov okhrannykh sistem [Physical principles of sensitive elements in sensors for security systems]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern information technologies: Proceedings of the international scientific and technical conference]. Penza: Penzenskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiia, 2011, iss. 14, pp. 203–204.

Khabarov D. N. Povyshenie effektivnosti obespecheniya bezopasnosti territorial'no-raspredelennykh ob'ektov volokonno-opticheskimi sistemami okhrany perimetra [Improving the efficiency of security arrangements at geographically distributed facilities with fiber optic perimeter security systems]. *Innovatsionnoe razvitiye ekonomiki: problemy i perspektivy: materialy Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ryazan', 5 aprelya 2012)* [Innovative development of the economy: problems and prospects: Proceedings of the all-Russian youth science and practice conference (Ryazan, April 5, 2012)]. Riazan': Riazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet imeni V. F. Utkina, 2012, pp. 165–167.

Для цитирования: Вахрамеев П. С., Вахрамеев Д. В., Максимов А. В., Харахнин К. А., Терешин Д. А. Система контроля состояния поверхности в режиме реального времени на основе

волоконной оптической решетки // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2019. – № 6 (93). – С. 10–23. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-6-93-1

For citation: Vakhrameev P. S., Vakhrameev D. V., Maksimov A. V., Kharakhnin K. A., Terreshin D. A. Real-time surface monitoring system based on fiber optic grating. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2019, no. 6 (93), pp. 10–23. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-6-93-1