УДК 681.586.5

В.В. Шишкин, И.В. Гранёв, И.С. Шелемба

ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В современном мире из множества существующих и успешно применяемых на практике технологий контроля и измерений физических параметров наиболее перспективными считаются датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) и распределенные датчики на основе комбинационного рассеяния света (эффекта Рамана). Волоконно-оптические датчики обладают множеством преимуществ по сравнению со своими электрическими аналогами. Эти преимущества делают их весьма привлекательными для применения во всех основных отраслях промышленности. В России лидером по производству и реализации решений на основе волоконно-оптических датчиков и технологий является компания «Инверсия-Сенсор», опыт которой рассматривается в данной статье.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, системы мониторинга, фотоника, кластер волоконно-оптических технологий, волоконные брэгговские решетки, эффект Рамана.

V.V. Shishkin, I.V. Granev, I.S. Shelemba

Inversion Sensor Co. Ltd., Perm, Russian Federation

DOMESTIC EXPERIENCE IN PRODUCTION AND APPLICATION OF FIBER OPTIC SENSORS

Nowadays sensors based on fiber Bragg gratings (FBG) and Raman scattering are some of the most advanced from existing and successfully utilized measuring technologies. Fiber optic sensors have many advantages in comparison with their electrical analogs. Those advantages make them attractive for application in major industries. Inversion Sensor Co. Ltd. is a leading company in production and implementation of fiber optic sensors in Russia. whose experience is treated in this paper.

Keywords: Fiber optic sensors, structural health monitoring systems, photonics, fiber optic cluster, fiber Bragg gratings, Raman effect.

Введение

Предприятие «Инверсия-Сенсор» было образовано в 2004 г. на площадке Академгородка в г. Новосибирске. Целью компании было с самого начала занять активную позицию и стать лидером по производству волоконно-оптических датчиков на отечественном рынке. В 2013 г. было принято решение о переносе предприятия в г. Пермь на

производственную площадку кластера «Фотоника», что помогло значительно ускорить развитие.

В настоящее время ООО «Инверсия-Сенсор» является лидером рынка Российской Федерации среди производителей волоконно-оптических датчиков, создавая все более серьезную конкуренцию классическим решениям. Компания продолжает вкладывать ресурсы в собственное развитие, что способствует постоянному росту.

Предприятие обеспечивает работой более 40 человек, имея в своем штате высококвалифицированных специалистов и профессионалов своего дела, не уступающих по уровню знаний и умений специалистам мирового уровня. Плановый рост компании рассчитан на штат более 150 человек. Сотрудники набираются среди лучших выпускников вузов г. Перми, где в рамках развития кластера «Фотоника» были созданы кафедры и открыты несколько направлений для будущих специалистов.

Помимо кадровых ресурсов, в базовые задачи предприятия входит развитие материально-технической базы. «Инверсия-Сенсор» – первая компания, которая смогла наладить собственное масштабное серийное производство волоконно-оптических датчиков в РФ и одна из немногих компаний мира, которая производит контрольно-измерительную аппаратуру на базе технологий ВБР и эффекта рамановского рассеяния. Административные и производственные площади компании, предназначенные для полного цикла разработки, производства датчиков и работы с заказчиком, составляют 2500 м².

Большая часть производимой и разрабатываемой аппаратуры создавалась согласно требованиям отраслевых лидеров, а решения проходили защиту в ведущих профильных институтах. На постоянной основе на предприятии ведутся работы по исследованию и улучшению текущих конструктивов датчиков. Компания активно принимает участие в государственных программах по развитию науки, промышленности и импортозамещению.

Вся продукция ООО «Инверсия-Сенсор» имеет необходимые сертификаты, а производство сертифицировано в соответствии со стандартом ISO 9001:2008. Помимо сертификатов Таможенного союза и сертификатов о внесении продукции в реестр средств измерений, получены сертификаты на пожарную безопасность и электромагнитную совместимость.

Важным показателем эффективности работы с заказчиком является комплексный подход. Помимо сертифицированной продукции, компания предоставляет услуги по ее сопровождению на различных уровнях: шеф-монтажные, строительно-монтажные и пусконаладочные работы, послегарантийное обслуживание и ремонт.

Сейчас продукция реализуется во всех основных промышленных отраслях: строительство, энергетика, нефтяная и газовая отрасль, авиостроение и т.д. Интерес к продукции растет и со стороны иностранных компаний.

Основной целью компании является непрерывный рост и поддержание престижа на внутреннем и внешнем рынках. Среди основных задач: лидерство на рынке Таможенного союза и ближнего зарубежья к 2018 г., укрепление позиций на рынках ближнего и дальнего зарубежья, разработка новых продуктов и решений, увеличение объемов продаж. К 2020 г. стоит задача стать конкурентоспособной и значимой компанией на глобальном рынке, расширяя экспортный потенциал и представляя Российскую Федерацию на уровне передовых компаний.

В основе всех технических решений ООО «Инверсия-Сенсор» лежат две технологии, которые входят в портфолио большинства мировых лидеров по производству волоконно-оптических датчиков: точечные ВБР-датчики и распределенные датчики на основе комбинационного рассеяния света в оптических волокнах (эффект Рамана).

1. Принцип работы ВБР-датчиков

Чувствительными элементами точечных волоконно-оптических датчиков являются волоконные брэгговские решетки (рис. 1). Такие решетки записаны в оптическом волокне при помощи (чаще всего) ультрафиолетового лазера и представляют собой участок световода с периодическим изменением показателя преломления вдоль оси. ВБР каждого датчика отражает свет определенной длины волны с шириной спектра $\sim 0,2$ нм.

При механическом и температурном воздействии изменяются период и показатель преломления решетки, вследствие чего мы наблюдаем смещение длины волны отраженного света. Измеряя величину этого смещения, можно определить относительную деформацию и изменение температуры. Для того чтобы разделять эти величины, необходимо

использовать одновременно две решетки, одна из которых изолирована от механических воздействий. По ней фиксируются сдвиги длины волны вследствие температурных изменений. Это позволяет учесть влияние температуры на вторую решетку, а также тепловое расширение материала, к которому прикреплен датчик, и, таким образом, измерить деформацию. В одной оптоволоконной линии может быть объединено множество решеток, каждая из которых дает отклик на своей длине волны, при этом расстояние между решетками может быть от 10 мм до нескольких километров.

Рис. 1. Волоконная брэгговская решетка

Распространенным методом опроса датчиков является сканирование массива ВБР перестраиваемым лазером, с фиксацией отражения при помощи фотодетектора. Диапазон перестройки у современных устройств составляет 100 нм (1500–1600 нм), частота опроса от 1 до 500 Гц, а количество параллельных каналов – до 8. В связи с тем что диапазон измерения датчиков может достигать ± 3000 отн. ед., что соответствует сдвигу длины волны на $\pm 3,5$ нм, в каждом канале рекомендуется размещать не более 25 датчиков, чтобы спектры ВБР не накладывались друг на друга в процессе измерения. Другим важным параметром является спектральное разрешение прибора. От него зависит разрешение датчиков по температуре и деформации. У современных анализаторов сигнала оно достигает 1 пм ($\sim 0,1$ °С, $\sim 10^{-6}$ отн. ед.).

Волоконно-оптические датчики обладают следующими преимуществами по сравнению со своими электрическими аналогами [1]:

- абсолютная невосприимчивость к электромагнитным полям и помехам;
- устойчивость к радиации;
- устойчивость к сложным климатическим условиям и агрессивным химическим средам;
- отсутствие необходимости электрического питания, заземления и гальванической развязки;
- абсолютная пожаробезопасность и взрывобезопасность;
- датчик может находиться на большом расстоянии (десятки километров) от считывающего устройства (справедливо как для квазираспределенных систем на основе ВБР, так и любых распределенных систем);
- малое время отклика датчика, малая тепловая инерционность;
- возможность последовательного соединения множества датчиков в одну цепочку;
- не являются источником радиоволн;
- не могут поразить электрическим током;
- не подвержены влиянию коррозии;
- обладают высоким экологическим индексом (безопасности окружающей среды);
- более высокое разрешение и меньшая погрешность по сравнению с классическими решениями;
- позволяют снизить нагрузку на структуру объектов за счет небольшого веса;
- компактность;
- срок службы 20 лет;
- первичная поверка распространяется на весь срок службы.

Для записи ВБР в оснащении компании есть три технологии: эксимерным лазером через фазовые маски с гибкой подстройкой параметров; через интерферометры ультрафиолетовым лазером и посредством пошаговой записи фемтосекундным лазером через защитные покрытия. Такое оснащение позволяет производить очень широкий спектр ВБР, которые применяются в производстве датчиков, оборудования для линий связи, лазерных установок и пр.

На основе ВБР производится основной объем волоконно-оптических датчиков, которые применяются для измерения физических величин: деформации, перемещения, давления, уровня жидкости, темпера-

туры, ускорения, вибрации и угла наклона. Сейчас количество производимых датчиков доходит до 1000 единиц в год. В 2016 г. планируется значительное увеличение объемов производства.

Сами ВБР тоже являются отдельным продуктом, они поставляются не только заказчикам на территории РФ, но и зарубежным производителям волоконно-оптических датчиков и лазерного оборудования.

2. Принцип работы датчика на основе эффекта Рамана

Распределенная система термометрии (Distributed Temperature Sensor) – система, предназначенная для непрерывного измерения температуры протяженных, сложных объектов. Чувствительным элементом системы является малогабаритный волоконно-оптический кабель большой длины (до 8 км), не требующий электрического питания. Система отличается широким диапазоном измерения температуры (от -55 до $+300$ °C), высокой точностью (до $\pm 0,5$ °C), высоким пространственным разрешением (до 0,5 м).

Чувствительный элемент системы DTS – кабель, в который помещается оптическое многомодовое волокно 50/125 мкм. Для каждого проекта подбирается индивидуальное решение по выбору конструкции кабеля, которая зависит от типа объекта мониторинга, того, как будет прокладываться кабель и какие воздействия он должен выдерживать.

Распределенный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния включает следующие основные элементы: импульсный лазер и подключенное к источнику оптическое волокно, которое является чувствительным элементом [2, 3]. Суть рамановского рассеяния состоит в обмене энергией между падающим фотоном и молекулой вещества: если молекула переходит из основного колебательного состояния в возбужденное, то рассеянный фотон смещается по частоте в красную область спектра и, таким образом, генерируется стоксова компонента. Возможен также и обратный процесс, когда структурная молекула теряет энергию и перерассеянный фотон с более высокой энергией генерирует антистоксову линию в синей области спектра относительно линии накачки (рис. 2). Очевидно, что заселенность возбужденного уровня напрямую зависит от температуры вещества, а значит, и интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять температурную зависимость. Таким образом, регистрируя вре-

менную динамику интенсивности антистоксовой компоненты при зондировании импульсным излучением, с помощью такого сенсора можно проводить измерения температуры вдоль всего волокна.

Рис. 2. Спектр рассеянного импульса

Соотношение интенсивностей антистоксовой и стоксовой компоненты показывает температурную зависимость по закону

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(\nu_0 + \nu_{\text{vib}})^4}{(\nu_0 - \nu_{\text{vib}})^4} \exp\left(\frac{-h\nu_{\text{vib}}}{kT}\right),$$

где I_a — интенсивность антистоксовой компоненты; I_s — интенсивность стоксовой компоненты; ν_0 — частота световой волны; ν_{vib} — смещение частоты световой волны; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Основные преимущества распределенных систем термометрии:

- возможность непрерывного температурного мониторинга протяженных объектов по всей их длине в реальном времени;
- пассивность, а значит, пожаробезопасность (датчик полностью диэлектрический);
- высокая чувствительность и точность;
- низкий вес и малогабаритность, низкая удельная стоимость;
- способность чувствительного элемента работать в очень широком диапазоне температур;
- устойчивость чувствительного элемента к вибрации и ударам;
- распределенные системы термометрии обеспечивают чрезвычайную гибкость при конфигурировании телеметрических систем.

Сферы применения распределенных систем термометрии:

- пожарное извещение на протяженных объектах (туннели, цеха, многоуровневые парковки);
- температурный каротаж (термомониторинг) нефтегазовых скважин;
- мониторинг температуры кабельных линий;
- контроль состояния конвейеров и трубопроводов;
- измерение температуры шахтовых выработок, обнаружение скрытых пожаров;
- контроль фильтрационных процессов на гидротехнических сооружениях.

Основным достижением компании в сегменте решений на базе технологии рамановского рассеяния является широкий модельный ряд – высокотехнологичное оборудование трех классов, различающихся по техническим характеристикам и стоимости. Такой подход позволил удовлетворить потребность наибольшего числа заказчиков. К 2016 г. в серию будет запущен 4-й класс систем, который позволит увеличить протяженность опрашиваемых сенсорных линий, что даст возможность в первую очередь расширить рынки нефтяного и энергетического секторов. На базе технологии рамановского рассеяния также производятся пожарные извещатели, которые занимают значительную долю производимой продукции.

С продукцией на основе технологии рамановского рассеяния стоит задача активно развивать внешние рынки. Было проведено исследование рынков США и Канады, которое показало, что объемы схожи с российским, но при этом их рынок обладает значительно большим потенциалом. Сейчас идут переговоры с несколькими крупными компаниями о сотрудничестве. В перспективе доля рынка, которую сможет занять компания, оценивается в 15–20 % к 2019 г.

3. Реализованные проекты

При помощи данных технологий уже было реализовано множество проектов в областях строительства, энергетики, нефтегазовой промышленности, авиастроения, композиционных материалов и т.д. Работы ведутся в рамках сотрудничества инновационных предприятий, входящих в состав пермского кластера волоконно-оптических технологий «Фотоника» (рис. 3).

Рис. 3. Пермский кластер волоконно-оптических технологий «Фотоника»

Наиболее крупные и сложные проекты будут рассмотрены ниже.

Футбольный манеж «Заря» в г. Новосибирске

Автоматизированная система мониторинга, установленная на стадионе «Заря» (рис. 4) в г. Новосибирске, позволяет следить за техническим состоянием объекта в режиме реального времени при минимальном участии человека. Система объединяет в себе 119 волоконно-оптических датчиков Astro; 85 датчиков деформации и 32 датчика температуры установлены на наиболее нагруженных элементах металлоконструкции при помощи точечной сварки (рис. 5).

Два датчика смещения с диапазоном измерения ± 40 мм установлены на фундаменте. Для опроса датчиков используется анализатор сигналов Astro A310 с восьмиканальным оптическим мультиплексором. Кроме того, в системе используется тахеометр Leica TS15 для измерения перемещений в 45 точках на девяти большепролетных рамах (рис. 6).

Показания датчиков снимаются раз в 6 часов. Для каждого датчика задано два критических уровня измеряемых значений (желтый и красный), при превышении которых система оповещения подает звуковой сигнал тревоги, выводит сообщение на сигнальный монитор в диспетчерской и отправляет sms- и e-mail-уведомления ответственным лицам. Частота опроса датчиков при этом увеличивается до 1 раза в 30 мин. Также отправляются уведомления в случае возникновения неполадок. Программное обеспечение позволяет удаленно просматривать показания всех датчиков в виде графиков относительной деформации, температуры и перемещения (рис. 7).

Рис. 7. Интерфейс программного обеспечения

Каскад Зарамагских ГЭС

Зарамагская ГЭС-1 находится на р. Ардон, притоке р. Терек в Республике Северная Осетия – Алания. Проектная мощность станции – 342 МВт, годовая выработка электроэнергии – 842 млн кВт·ч., расчетный напор – 609,4 метров. В состав гидроэлектростанции входит много сложнейших инженерных объектов, значительная часть которых находится под землей в скальном массиве.

Большая протяженность и сложность гидротехнических сооружений требуют особого подхода к организации мониторинга в плане надежности конструкций и применения новейших типов датчиков.

Одним из самых сложных объектов в плане размещения контрольно-измерительной аппаратуры является деривационный туннель № 2 (рис. 8). Контролю подлежат следующие параметры туннеля: напряженное состояние арматуры и температура железобетонной обделки, раскрытие строительных швов, раскрытие сводовой части железобетонной обделки, фильтрационное противодействие под дном туннеля и уровень воды.

Рис. 8. Деривационный туннель

Большая длина туннеля ограничивает возможность применения электрических датчиков, так как максимальное расстояние, при котором возможно считывание показаний, превышает 1 км. Если «крайние» пикеты еще можно контролировать традиционными датчиками, то для более дальних необходимо либо применять датчики с большим расстоянием разнесения от прибора, либо размещать в туннеле устройства опроса или повторители/усилители сигналов. Размещение считывающих устройств в туннеле неоправданно ввиду сложности строительно-монтажных работ, дальнейшего обслуживания, необходимости подвода электрического питания, а также размещения оборудования в шкафах с абсолютной защитой от воды (степень защиты IP68). Вывод кабеля из туннеля на поверхность также невозможен, поскольку он на-

ходится на территории Северо-Осетинского государственного запovedника. Исходя из данной задачи были сформулированы требования к контрольно-измерительной аппаратуре по степени защиты (IP68), электрическому питанию (датчик не должен требовать питания), дальности разнесения датчика и считывающего устройства (7–8 км).

В деривационном туннеле используются волоконно-оптические датчики деформации, температуры, линейных перемещений и давления. Датчик деформации используется для измерения напряженного состояния арматуры и наваривается непосредственно на ее поверхность. Для исключения влияния бетона на датчик его измерительная часть покрывается защитным материалом. Для учета температурных влияний на значения деформаций в точке установки дополнительно размещается датчик температуры. Датчики линейных перемещений используются для измерения раскрытия швов между железобетонной обделкой и скалой.

Датчик давления используется для измерения уровня воды в туннеле и измерения противодействия под железобетонной обделкой дна. Температурная компенсация датчиков давления и линейных перемещений производится программными методами с помощью встроенных датчиков температуры.

На сварных швах металлической обечайки в шахте вертикального водосброса устанавливались датчики деформации в продольном и поперечном направлении оси шахты (рис. 9). Для температурной компенсации показаний устанавливался датчик температуры. Учитывая сложность монтажа, необходимо было минимизировать количество выводимых на поверхность кабелей, для чего датчики объединялись в цепочки по 9 штук.

Рис. 9. Датчик деформации на сварном шве

Заключение

Благодаря своим преимуществам волоконно-оптические датчики позволяют находить новые уникальные решения для отрасли. Среди

новейших разработок, которые уже реализуются: АСМП (система гидрофльтрации), гидротехнический кабель (система гидрофльтрации), распределенный термомониторинг ЛЭП, система высокоточных датчиков угла наклона, которая будет установлена на каскаде ГЭС в Дагестане.

В ближайшей перспективе планируется разработка новых датчиков: датчика тока; высокочастотного акселерометра; датчика для мониторинга гололедных образований на ЛЭП; датчика для применения в атомной энергетике; распределенного датчика на основе «бесконечной» решетки показателя преломления, а также миниатюрного анализатора сигналов на базе интегральной оптики.

Фотоника в целом и направление волоконно-оптических датчиков в частности стали неотъемлемой частью той области современных наук, которая созвучна с научно-техническим прогрессом, инновациями, высокой квалификацией. Прогресс невозможно отменить, как и внедрение его результатов в наше окружение. Самым сложным, пожалуй, является не результат, полученный в ходе научных исследований, а его интерпретация в серийной продукции. Специалистам ООО «Инверсия-Сенсор» первыми удалось добиться подобных результатов в направлении волоконно-оптических датчиков. Но это расценивается только как начало пути, впереди стоят цели по выводу компании на международный уровень и укреплению конкурентоспособности с мировыми лидерами.

Список литературы

1. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. – 2nd ed. – 2011.
2. Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 11. – С. 1078–1081.
3. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology / Ed. By José Miguel López-Higuera. – 1st ed. – 2002.

References

1. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. 2nd ed. 2011.

2. Kuznetsov A.G., Babin S.A., Shelemba I.S. Raspredeleennyi volokonnyi datchik temperatury so spektral'noi fil'tratsiei napravlennymi volokonnymi otvetviteliami [Fiber distributed temperature sensor with spectral filtration by directional fibre couplers]. *Kvantovaya elektronika*, 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1078-1081.

3. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology. Ed. By José Miguel López-Higuera. 1st ed. 2002.

Получено 15.03.2016