

На правах рукописи

Шелемба Иван Сергеевич

**Методы опроса распределенных волоконно-оптических
измерительных систем и их практическое применение**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН
заведующий лабораторией волоконной оптики
ИАиЭ СО РАН
Бабин Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: Нуреев Ильнур Ильдарович
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ/Институт радиоэлектроники и коммуникаций

Дашков Михаил Викторович
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Конструкторско-технологический
институт научного приборостроения Сибирского
отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «__»_____ 2018 года в __ час. на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН, по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «__»_____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н. Ильичёв Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность

Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Благодаря уникальным свойствам оптоволоконные датчики широко используются в решении различных научных и практических задач, в которых необходимо измерять температуру, деформации и другие параметры протяжённых объектов [1-3]. Так, волоконные датчики используются в угле-, нефте- и газодобыче для измерения температуры и давления в скважинах, а также для мониторинга трубопроводов [4]. Волоконные датчики температуры могут применяться в системах пожарной сигнализации различных сооружений, а также в энергетике [5]. Датчики деформаций и вибраций на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) используются для мониторинга элементов конструкций в капитальном строительстве и объектах энергетики [6]. В атомной энергетике используются радиационно-стойкие датчики. Кроме того, в последнее время активно развиваются технологии внедрения датчиков в композитные материалы для он-лайн мониторинга состояния изделий из этих материалов (в объектах инфраструктуры, авиастроении, космической технике и т.д.) [7].

Оптоволоконные датчики можно условно разделить на две группы: точечные и распределённые. Точечные датчики основаны на использовании волоконной брэгговской решётки (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого воздействия в оптический сигнал [8], при этом сенсорную систему с большим количеством точечных ВБР-датчиков можно считать квази-распределённой. В распределённых датчиках в качестве чувствительной среды используется вся длина оптического волокна. В качестве измеряемого оптического сигнала используется рассеянный свет (за счёт эффектов Рэлея, Мандельштама-Бриллюэна или Рамана), а метод оптической временной рефлектометрии (ОВР) позволяет измерять распределение температуры, деформации или другого воздействия вдоль оптического волокна [9-11].

Масштабы практического использования волоконных сенсорных систем ограничены достаточно высокой ценой оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков, как в случае точечных датчиков (ВБР), так и в случае распределённых. Кроме того, для повышения надёжности и долговременной стабильности работы сенсорной системы, включая устройство опроса, обычно

требуется полностью волоконная её реализация. Так, использование широкополосного источника излучения и спектроанализатора позволяет зафиксировать изменение температуры точечного сенсора величиной 0.1°C или относительное растяжение величиной $\sim 10^{-6}$, но такая система очень дорога и не является полностью волоконной. Одним из возможных вариантов реализации волоконной схемы опроса точечных датчиков является использование узкополосного непрерывного перестраиваемого волоконного лазера и фотодетектора, на который поступает отражённое от ВБР излучение. Для опроса распределённой сенсорной системы на основе комбинационного рассеяния света (эффект Рамана) перспективным представляется использование импульсного эрбиевого лазера и волоконных фильтров на основе ВБР и волоконных ответвителей.

Таким образом, создание новых эффективных и недорогих волоконных устройств опроса является актуальной и важной задачей.

Цель работы

Цель работы состояла в разработке методов опроса распределённых волоконных сенсорных систем (как на основе массива ВБР-датчиков, так и на основе комбинационного рассеяния света в пассивном световоде) в полностью волоконном варианте, максимально пригодных для практических применений.

Задачи работы

Для достижения указанных целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка перестраиваемого эрбиевого лазера на основе перестраиваемой ВБР.
2. Разработка методов опроса массива ВБР-датчиков.
3. Разработка волоконной схемы и методов опроса распределённого датчика на основе комбинационного рассеяния света в волокне.
4. Применение реализованных сенсорных систем на практике.

Научная новизна

К моменту начала исследований актуальным направлением являлось создание полностью волоконных недорогих устройств опроса датчиков на основе ВБР и распределённых сенсорных систем.

В диссертационной работе предложена и реализована полностью волоконная схема опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, для устранения нелинейности которой применялся интерферометр Маха-Цандера. Привязка к абсолютному значению длины волны осуществлялась с помощью термостабилизированных ВБР. Данный метод позволяет реализовать устройство, способное опрашивать до 90 датчиков, при этом точность измерения температуры составляет $0.5-1^{\circ}\text{C}$.

Предложена и реализована простая схема опроса ВБР-датчиков конечных положений (датчиков со сниженной точностью измерений, во многих случаях достаточной для мониторинга состояния техногенных объектов) с гибридным (одновременно временным и спектральным) типом мультиплексирования на основе импульсного источника, рефлектометра и перестраиваемой ВБР. Данная система опроса позволяет опрашивать до 64 датчиков при достаточной чувствительности (80 микрострейн при регистрации относительного удлинения, 5°C при регистрации температуры) и низкой стоимости.

Предложена и реализована схема опроса распределённого датчика температуры на основе комбинационного рассеяния (КР) света в одномодовом и многомодовом волокне с использованием волоконного импульсного лазера. В схеме применён новый метод фильтрации с использованием ВБР и направленных спектрально-селективных ответвителей. Использование предложенного метода позволило производить измерения интенсивности компонент КР в широком спектральном диапазоне с минимальными потерями. Чувствительность разработанного датчика по температуре составляет несколько градусов для одномодовой волоконной линии протяжённостью до ~ 10 км. Пространственное разрешение определяется длительностью импульса и полосой пропускания фотодетектора и составляет ~ 10 м.

Практическая значимость

Оптоволоконные датчики температуры были впервые применены для измерения температуры элементарных проводников обмотки статора при

стендовых испытаниях турбогенератора мощностью 225 МВт. В результате обработки данных, полученных из опроса массива ВБР датчиков, встроенных в изоляцию токоведущих элементов, определен эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции проводников статора мощного турбогенератора и средний коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки в лобовой зоне статора. Успешный опыт реализации температурных измерений свидетельствует о принципиальной адаптируемости данной измерительной системы к технологии производства крупных электрических машин.

На основе ВБР-датчиков реализована автоматизированная система мониторинга технического состояния несущих конструкций футбольного манежа и других уникальных зданий и сооружений (более 10 объектов). Система обеспечивает безопасное функционирование объектов за счёт своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряжённо-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований или крена, которые могут повлечь за собой переход объектов в ограниченно работоспособное или аварийное состояние.

Предложена и реализована оригинальная система пожарного извещения на основе распределённого датчика температуры (извещатель «ЕЛАНЬ»). Извещатель может применяться на предприятиях нефтегазового комплекса, шахтах, рудниках, подземных выработках, на химических производствах (в том числе с агрессивными средами), на предприятиях металлургии и энергетики. Произведено и установлено более сотни таких систем. Извещатель выпускается также в модификации «взрывозащищенное исполнение» - «ЕЛАНЬ-Ех».

Впервые реализована система мониторинга температуры токоведущих и конструктивных элементов высокотемпературной и низкотемпературной сверхпроводящих кабельных линий при азотных температурах. На основе данной системы реализованы проекты по мониторингу высоковольтных кабельных линий (силовые кабели электростанций, подстанций; грозотрос магистральной электрической сети «Юг»).

Реализована система мониторинга температуры нефтяных скважин, позволяющая отслеживать динамику распределения температуры по глубине скважины в режимах закачки пара и добычи высоковязкой нефти. Подобными системами оснащено более 150 скважин.

Апробация работы

Материалы работ по теме диссертации были доложены на следующих конференциях и семинарах: Научно-практическая конференция молодых учёных и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображения» (2006 г. – Новосибирск); VIII Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006» (26-28 сентября 2006 г. – Новосибирск); Российский семинар по волоконным лазерам 2007 (4-6 апреля 2007 г. – Новосибирск); 16th International Laser Physics Workshop LPHYS'07 (20-24 августа 2007 г. – Леон, Мексика); 6th Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2007 (15-18 сентября 2007 г. – Владивосток); Симпозиум «Нанофотоника 2007» (18-22 сентября 2007 г. – Черногоровка); Школа-семинар "Инновации: от идеи до продукта" (2008 г. – Новосибирск); Российский семинар по волоконным лазерам (1-4 апреля 2008 г. – Саратов); 13th conference on Laser Optics, LO 2008 (23-28 июня 2008 г. – Санкт-Петербург, Россия); 17th International Laser Physics Workshop LPHYS'08 (30 июня - 4 июля 2008 г. – Трондхейм, Норвегия); Российский семинар по волоконным лазерам (31 марта - 2 апреля 2009 г. – Уфа); The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments ISMTII'2009 (28 июня - 2 июля 2009 г. – Санкт-Петербург); 18th International Laser Physics Workshop LPHYS'09 (13-17 июля 2009 г. – Барселона, Испания); Всероссийская конференция по волоконной оптике (8-9 октября 2009 г. – Пермь); Молодёжная конференция «Фотоника и оптические технологии» (10-11 февраля 2010 г. – Новосибирск); IV Российский семинар по волоконным лазерам (19-22 апреля 2010 г. – Ульяновск); Первая Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (6-8 декабря 2011 г. – Москва); VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства» (9-11 апреля 2013 г. – Новосибирск); 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors (2-6 июня 2014 г. – Сантандер, Испания); Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2017 (3-6 октября 2017 г. – Пермь).

Результаты также докладывались на научном семинаре Института автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск (14 декабря 2017 г.)

Защищаемые положения

1. Полностью волоконная схема устройства опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, интерферометром Маха-Цандера и термостабилизированной реперной ВБР позволяет устранить нелинейности при перестройке ВБР и осуществить привязку к абсолютному значению длины волны, и тем самым повысить точность измерений резонансных длин волн массива датчиков со спектральным мультиплексированием.
2. Метод опроса ВБР-датчиков с гибридным (одновременно временным и спектральным) типом мультиплексирования на основе рефлектометра и перестраиваемой брэгговской решётки позволяет увеличить количество опрашиваемых датчиков при достаточной чувствительности и низкой стоимости.
3. Схема опроса распределённого датчика температуры на основе комбинационного рассеяния света в одномодовом и многомодовом волокне с использованием волоконного импульсного лазера и волоконных фильтров Стокса и антистоксова рассеянного излучения на основе спектрально-селективных ответвителей позволяет реализовать полностью-волоконный вариант, отличающийся простотой, стабильностью и низкой стоимостью.
4. Разработанные системы на основе ВБР-датчиков эффективны для практических применений. В частности, ВБР, встроенные в изоляцию токоведущих элементов, позволяют измерить распределение температуры проводников статора мощного турбогенератора во время его работы (он-лайн), а автоматизированная система мониторинга технического состояния позволяет осуществлять он-лайн мониторинг несущих конструкций объектов инфраструктуры сложной топологии.
5. Разработанные системы распределённого измерения температуры на основе комбинационного рассеяния света позволяют реализовать в приборном исполнении эффективные системы пожарного извещения, а также системы мониторинга нефтяных скважин и силового кабеля.

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. И.С. Шелемба занимался проведением экспериментов, обработкой результатов, активно участвовал в обсуждениях результатов и подготовке статей.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 статьях в рецензируемых научных журналах [А1-А14], 11 из которых входят в список определённых высшей аттестационной комиссией (ВАК), а также в 25 материалах конференций и семинаров [А15-А39], зарегистрированы 4 патента на изобретение [А40-А43].

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации, а также приложений, содержащих акты о внедрении. Диссертация изложена на 135 страницах, содержит 72 рисунка. Список литературы содержит 113 наименований.

Основное содержание работы

Во введении описывается область проведения исследований. Представлено состояние работ в этой области к моменту начала диссертационной работы, определена актуальность и практическая значимость работы. В этой части сформулированы цель и задачи работы, описано содержание текста диссертации по главам. Приводится информация о количестве публикаций автора по теме исследования, а также о количестве патентов. В конце введения сформулированы защищаемые положения диссертации.

В первой главе рассмотрены основы точечных и распределённых сенсорных систем. В параграфе 1.1 описан принцип работы ВБР-датчиков и приведены формулы для сдвига брэгговской длины волны вследствие деформации и изменения температуры:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T = \lambda_B (\alpha + \sigma) \Delta T, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ – коэффициент температурного расширения, а $\sigma = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ –

термооптический коэффициент оптического волокна.

Далее указаны методы для разделения вкладов деформации и температуры в сдвиг брэгговской длины волны. Описаны принципы мультиплексирования ВБР в схемах с временным и спектральным разделением каналов.

В параграфе 1.2 определены два основных вида оптических сенсорных систем (распределённые и квази-распределённые), оценены возможности их пространственного разрешения. Выделены три типа распределённых систем, использующих рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, отмечены их особенности, обусловленные физическими процессами, лежащими в основе каждой из систем. Изложены принципы оптической рефлектометрии с разверткой по времени (optical time domain reflectometry, OTDR) и частоте (optical frequency domain reflectometry, OFDR), применяемые для определения точки измерения при регистрации обратного рэлеевского и комбинационного рассеяния. Указаны методы регистрации спонтанного и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

Для квази-распределённых систем представлена классификация волоконных датчиков по четырём категориям в зависимости от регистрируемой модуляции параметров (датчики амплитудной модуляции, фазовой модуляции, частотной и поляризационной). Представлена концепция и описаны схемы временного и спектрального разделения каналов для опроса массива датчиков.

Во второй главе рассматривается квази-распределённая система на основе массива ВБР-датчиков.

В параграфе 2.1 представлена реализация перестраиваемого эрбиевого лазера. Описаны характеристики эрбиевого лазера (выходная мощность, диапазон перестройки), перестраиваемого при помощи дифракционной решётки и ВБР. Показано, что оптимальным элементом для селекции длины волны генерации является перестраиваемая ВБР.

Реализованы три конфигурации перестраиваемого эрбиевого лазера с линейным резонатором, с кольцевым резонатором, с кольцевым резонатором и циркулятором, проведено сравнение выходных характеристик. Показано, что

наименьшую ширину линии генерации (14 нм) и наилучшую стабильность можно получить в схеме с кольцевым резонатором и циркулятором.

В параграфе 2.2 представлена схема волоконно-оптической сенсорной системы на основе широкополосного источника и спектроанализатора Ando AQ6317B с разрешением ~ 10 нм, собранной для опроса массива из 12-ти ВБР. Отмечено, что погрешность определения температуры в данной системе не превышает 0.5°C , а количество сенсоров может быть увеличено до нескольких десятков.

Далее представлена схема сенсорной системы на основе узкополосного перестраиваемого лазера с диапазоном перестройки ~ 1530 - 1580 нм и фотодетектора (рис. 1а). Приведены зависимости мощности перестраиваемого лазера от длины волны генерации и резонансной длины волны перестраиваемой ВБР от количества оборотов шагового двигателя. Приведён спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров, прописанный при помощи перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера (рис. 1в).

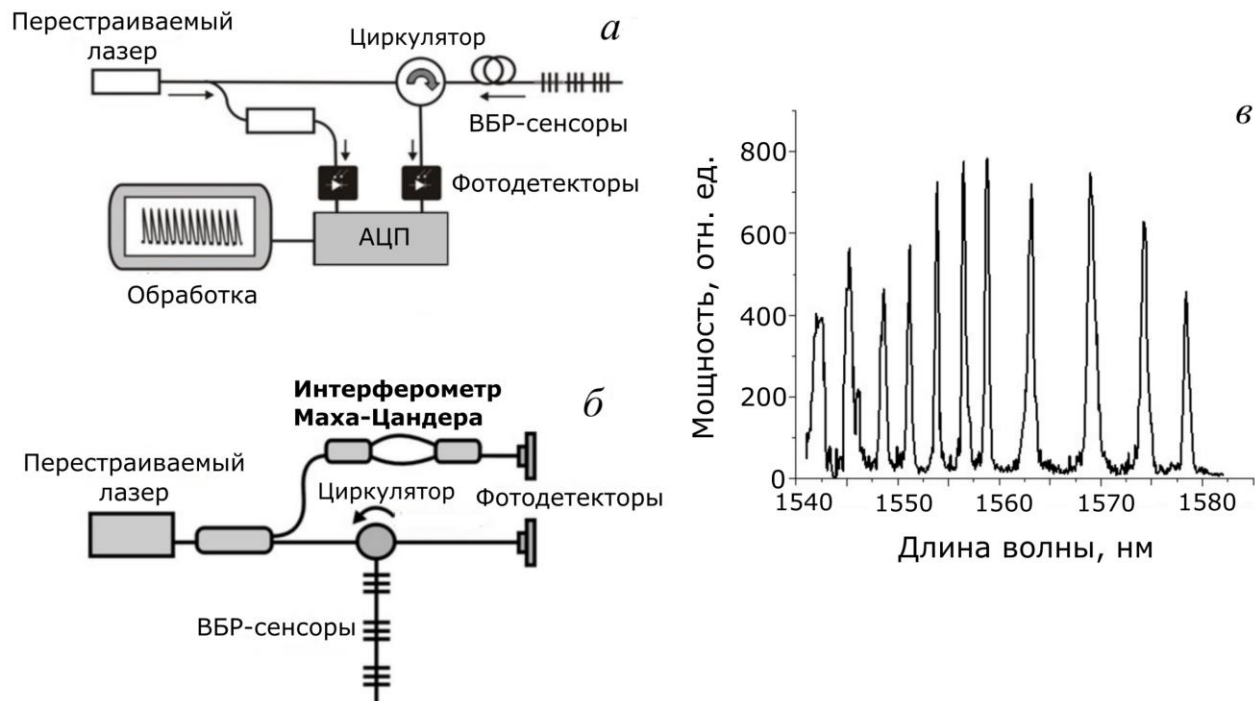


Рис.1. (а) Схема опроса ВБР-датчиков на основе эрбиевого лазера; (б) схема опроса, использующая интерферометр Маха-Цандера; (в) спектр отражения массива из 12-ти ВБР-датчиков, прописанный при помощи перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера.

Диапазон перестройки составил >45 нм с шагом 4 пм, что позволяет опрашивать до 45-ти датчиков температуры с разрешением 0.4°C в диапазоне изменения температуры каждого датчика $>100^{\circ}\text{C}$.

Предложен и реализован способ решения проблемы нелинейности перестроечной кривой ВБР, основанный на применении термостабилизированных реперных ВБР и интерферометра Маха-Цандера (рис. 1б) с областью свободной дисперсии ~ 30 ГГц. Отмечено, что данный метод позволяет реализовать устройство опроса до 90 датчиков с точностью $0.5-1^{\circ}\text{C}$.

В параграфе 2.3 представлено теоретическое и экспериментальное исследование метода оптической временной рефлектометрии в случае детектирования и мультиплексирования сигналов чувствительных элементов на основе ВБР. Приведено выражение для изменения мощности отражённого излучения в зависимости от параметров зондирующего импульса и изменения резонансной длины волны ВБР:

$$\Delta P \approx \left[\frac{d}{d\lambda} A(\lambda_{BR}) \right] A_{FBG} \Delta \lambda_{FBG}, \quad (2)$$

где $\Delta \lambda_{FBG} = 2n_{eff} A_{mod} (\alpha_1 \varepsilon + \alpha_2 \Delta T)$ – сдвиг резонансной длины волны брэгговской решётки в зависимости от температуры (T) и механического напряжения (ε), α_1 , α_2 – коэффициенты, определяемые свойствами материала ВС.

Представлены зависимости мощности, отражаемой тестовой ВБР, от относительного удлинения и температуры решётки, полученные в реализованной схеме опроса. Пороговая чувствительность метода в режиме регистрации относительного удлинения ВБР составила 80 микрострейн, в режиме регистрации температуры – 5°C . Представлена оценка максимального количества мультиплексируемых в данной схеме ВБР (64 решётки). Отмечено, что данный метод перспективен для опроса датчиков конечных положений.

В параграфе 2.4 описана практическая реализация многоканальной системы измерения температуры на базе оптоволоконных датчиков, разработанная для измерения температуры элементарных проводников обмотки статора при стендовых испытаниях турбогенератора мощностью 225 МВт производства филиала ОАО «Силовые машины»-«Электросила». Описаны процедуры градуировки датчиков после их установки на неизолированный стержень (рис. 2) и на полностью собранной неподвижной машине в состоянии теплового равновесия обмотки статора с окружающей средой до стендовых испытаний и после них.

Представлены измерения температуры элементарных проводников обмотки статора, выполненные в процессе стендовых испытаний турбогенератора в продолжительных режимах косвенной нагрузки (установившееся трёхфазное короткое замыкание при номинальном токе статора, холостой ход при номинальном напряжении и режим без возбуждения). На базе обработки полученных температурно-временных зависимостей оптоволоконных датчиков на протяжении полного цикла испытаний определен эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции $\lambda_{и}$ (в приближении одноёмкостной модели) и средний коэффициент теплоотдачи α с поверхности обмотки в лобовой зоне статора.

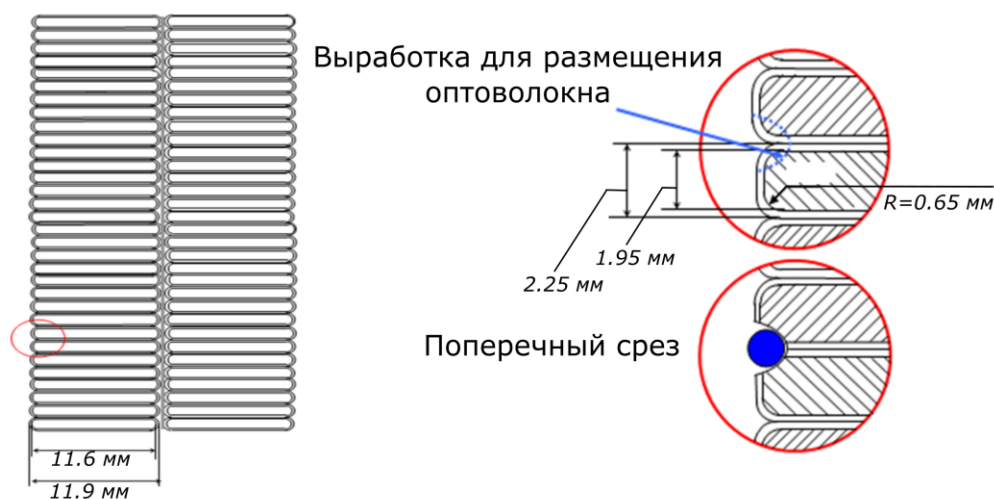


Рис. 2. Схема размещения оптоволоконна на стержне обмотки статора.

Параграф 2.5 посвящен мониторингу сооружений сложной топологии. На примере манежа «Заря» перечислены цели и задачи мониторинга. Приведены примеры неблагоприятных факторов, приводящих к постепенной деградации несущей способности конструкций. Назначены объекты (точки) для контроля, обоснован их выбор. Перечислены параметры, мониторинг которых может производиться с помощью ВБР. Описана реализация системы мониторинга, объединяющей в себе 85 датчиков деформации (чувствительность 1.2 пм/микрострейн, диапазон измерений ± 2500 микрострейн) и 32 датчика температуры (чувствительность 10 пм/°С, диапазон измерений от -20 до 80 °С), установленных в контрольных точках металлоконструкции. Два датчика смещения с диапазоном измерения ± 40 мм установлены на фундаменте. Описана структура и принцип работы системы оповещения. Приведены и

проанализированы данные долговременного мониторинга, описана их практическая ценность. Перечислены другие уникальные здания и сооружения, где были реализованы подобные системы мониторинга.

В третьей главе описана распределённая сенсорная система на основе комбинационного рассеяния. В параграфе 3.1 представлена разработка метода опроса распределённого волоконного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния с использованием эрбиевого волоконного лазера с модуляцией добротности. Предложен и реализован новый метод фильтрации стоксовой и антистоксовой компонент на основе ВБР и направленных спектрально-селективных ответвителей, который позволил производить измерения интенсивности компонент КР в широком спектральном диапазоне с минимальными потерями (рис. 3). Отношение интенсивностей стоксовой I_s и антистоксовой I_{as} компонент описывается формулой:

$$\frac{I_{as}(T)}{I_s(T)} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T} \right), \quad (3)$$

где λ_s и λ_{as} – длины волн стоксовой и антистоксовой линий, k_B – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка. Коэффициенты затухания стоксовой и антистоксовой волн различны и зависят от температуры, что должно быть принято во внимание для корректного расчёта температуры по их интенсивностям (рис. 4).

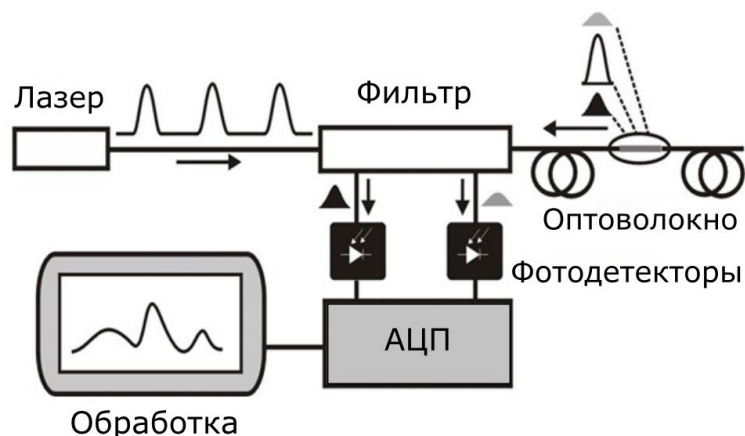


Рис. 3. Схема распределенного датчика температуры.

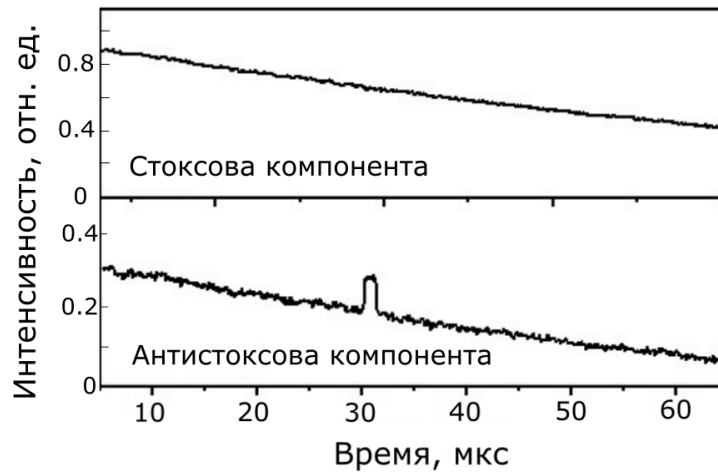


Рис. 4. Временная зависимость интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент.

Чувствительность разработанного датчика по температуре составила несколько градусов для одномодовой волоконной линии протяжённостью до ~10 км, пространственное разрешение ~10 м.

В параграфе 3.2 описана конструкция серийных распределённых волоконно-оптических измерительных систем на основе многомодового оптического волокна. Описаны функциональные схемы оптической и электронной частей блока обработки.

В параграфе 3.3 обсуждаются метрологические свойства распределённых датчиков температуры, отмечена и проиллюстрирована взаимная зависимость пространственного разрешения, чувствительности по температуре, длины чувствительного элемента и времени измерения. Приведено сравнение разработанных систем с ведущими мировыми аналогами по интегральному параметру М (Figure-of-Merit).



Рис. 5. Извещатель пожарный тепловой линейный ИП 132-1-Р «ЕЛАНЬ».

В параграфе 3.4 обоснованы преимущества использования волоконных сенсоров температуры для обнаружения пожаров, обозначена область применения пожарного извещателя на основе оптоволокна. Представлено устройство и технические характеристики разработанного пожарного извещателя «ЕЛАНЬ» (рис. 5), перечислены функции блока обработки извещателя. Отмечена возможность использования извещателя во взрывоопасных зонах. Отмечено широкое использование разработанного извещателя (установлено более сотни подобных систем).

В параграфе 3.5 представлена разработанная и созданная оптоволоконная распределённая система низкотемпературной диагностики высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии (ВТСПКЛ), предназначенная для оперативного контроля и управления в реальном времени штатными эксплуатационными и перегрузочными режимами работы сверхпроводниковых электроэнергетических объектов.

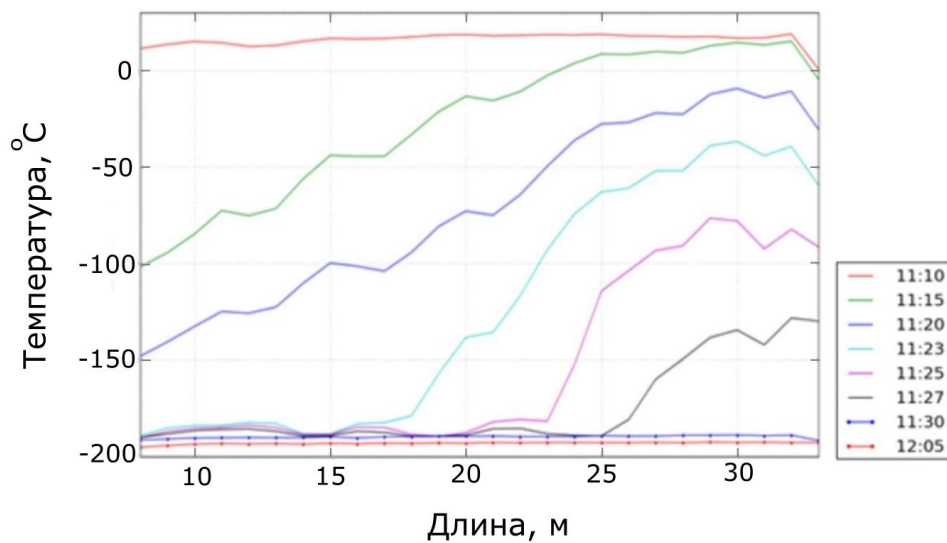


Рис. 6. Динамика процесса захолаживания ВТСПКЛ ПТ.

Проведены испытания данной системы на макете реального ВТСПКЛ постоянного тока (ПТ). Приведена качественная зависимость температуры криогента (паро-жидкостная смесь жидкого азота), циркулирующего в системе, на выходе из ВТСПКЛ ПТ от времени процесса. Полученной зависимостью пришлось ограничиться в силу сильной нестационарности и неравновесности процессов, протекающих в системе захолаживания и криостатирования даже при длительной её эксплуатации. Показана динамика захолаживания последнего (второго) по потоку криогента 30-м отрезка ВТСПКЛ ПТ и некоторые

характерные профили температуры по его длине, полученные в процессе проведения испытания в различные моменты времени (рис. 6). Представлен профиль температуры криогента вдоль ВТСПКЛ ПТ в квазистабильном режиме. Отмечено, что выполнение данной работы позволило сформировать технический задел для последующей реализации проектов по мониторингу высоковольтных (не сверхпроводящих) кабельных линий.

В параграфе 3.6 описана реализация системы термометрии нефтяных скважин на основе распределённых датчиков температуры. Система позволяет фиксировать профиль температуры в скважине в режиме реального времени, что является необходимым при использовании паронагнетательной технологии добычи нефти. Приведены параметры системы и принципиальная схема её работы. Представлены результаты измерений динамики распределения температуры по глубине скважины в режимах закачки пара и добычи нефти.

Отмечено, что в период 2015-2018 гг. подобными системами было оснащено более 150 скважин, многие из которых находятся в эксплуатации более 2-х лет.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты:

1. Реализована полностью волоконная схема устройства опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, интерферометром Маха-Цандера для устранения нелинейностей перестраиваемой ВБР, и термостабилизированными ВБР для привязки к абсолютному значению длины волны. Точность определения длины волны составила 15 пм для диапазона перестройки 20 нм и 30 пм для диапазона 45 нм.
2. Реализована схема устройства опроса ВБР датчиков с гибридным (одновременно временным и спектральным) типом мультиплексирования на основе рефлектометра и перестраиваемой брэгговской решетки. Достигнута чувствительность деформации ВБР на уровне $0.5 \cdot 10^{-4}$. Предложено применение метода для мониторинга датчиков конечных положений.
3. Разработана схема опроса распределённого датчика температуры на основе комбинационного рассеяния в одномодовом и многомодовом волокнах с использованием импульсного волоконного лазера и волоконных фильтров стоксова и антистоксова излучения на основе спектрально-селективных ответвителей. Реализованы коммерческие версии приборов с

характеристиками на уровне мировых аналогов: температурное разрешение 0.4°C на длине 16 км.

4. При помощи массива ВБР датчиков, встроенных в изоляцию токоведущих элементов, впервые измерено распределение температуры проводников статора мощного турбогенератора. На базе обработки полученных температурно-временных зависимостей оптоволоконных датчиков на протяжении полного цикла испытаний определен эквивалентный коэффициент теплопроводности корпусной изоляции $\lambda_{\text{и}} = 0.26 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ (в приближении одноёмкостной модели) и средний коэффициент теплоотдачи $\alpha = 38 - 42 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ с поверхности обмотки в лобовой зоне статора.
5. Реализована автоматизированная система мониторинга технического состояния несущих конструкций футбольного манежа на основе оптоволоконных датчиков. Приведены результаты долговременного наблюдения за конструкцией. Зафиксированы ежегодные деформации стержней центрального прогона (до 300 микрострейн) и перемещения в коньке (до 56 мм), обусловленные снеговой нагрузкой на конструкцию в зимний период.
6. Предложена и реализована оригинальная система пожарного извещения на основе распределённого датчика температуры, позволяющая контролировать протяжённые объекты длиной до 8000 метров с использованием одного блока детектирования.
7. Реализована система мониторинга температуры токоведущих и конструктивных элементов ВТСП и НТСП объектов при азотных температурах. Показана динамика захолаживания сверхпроводника.
8. Реализована система мониторинга нефтяных скважин, позволяющая измерять температуру в диапазоне $-50..250^{\circ}\text{C}$ на длине до 4000 метров. Продемонстрирована динамика распределения температуры по глубине скважины в режимах закачки пара и добычи высоковязкой нефти.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах:

- A1.** Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser // *Laser Physics*. – 2007. – V.17, №11. – P.1340-1344.
- A2.** Бабин С. А., Власов А. А., Каблуков С. И., Шелемба И. С. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток // *Вестник НГУ: Серия Физика*. – 2007. – №3. – С. 54-57.
- A3.** Бабин С. А., Власов А. А., Шелемба И. С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решеток // *Химия высоких энергий*. – 2008. – Т.42, №4. – С.35-37.
- A4.** Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry // *Laser Physics*. – 2008. – V.18, №11. – P.1301-1304.
- A5.** Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Шелемба И.С. Спектрально-временное детектирование сигналов ВБР с помощью метода оптической временной рефлектометрии // *Фотоника*. – 2008. – Т.9, №3. – С.18-19.
- A6.** Исмагулов А.Е., Бабин С.А., Подивилов Е.В., Федорук М.П., Шелемба И.С., Штырина О.В. Модуляционная неустойчивость при распространении узкополосных наносекундных импульсов в волоконном световоде с аномальной дисперсией // *Квантовая электроника*. – 2009. – Т.39, №8. – С.765–769.
- A7.** 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.
- A8.** Бабин С.А., Кузнецов А.Г., Шелемба И.С. Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решёток и комбинационного рассеяния света в оптическом волокне // *Автометрия*. – 2010. – Т.46, №4. – С.70-77.
- A9.** Babin S.A., Kuznetsov A.G., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Comparison of Raman and Fiber Bragg Grating-Based Fiber Sensor Systems for Distributed Temperature Measurements // *Key Engineering Materials*. – 2010. – V.437. – P.309-313.
- A10.** Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Shelemba I.S., Shtyrina O.V. Modulation instability at propagation of narrowband 100-ns pulses in

optical fibers of various types // Laser Physics. – 2010. – V.20, №2. – P.334-340.

A11. Гуревич Э.И., Лямин А.А., Шелемба И.С. Опыт измерения температуры обмотки статора оптоволоконными датчиками при стендовых испытаниях турбогенератора // Электрические станции. – 2010. – №4. – С.42-47.

A12. Бабин С.А., Голушко С.К., Цыба А.М., Чейдо Г.П., Шелемба И.С., Шакиров С.Р. Концепция многофункциональной системы безопасности угольной шахты с использованием волоконно-оптических технологий // Вычислительные технологии. – 2013. – Т.18, Спец. выпуск. – С.95-101.

A13. Шишкин В.В., Гранёв И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т.3, №1. – С.61-75.

A14. Shishkin V.V., Terentyev V.S., Kharenko D.S., Dostovalov A.V., Wolf A.A., Simonov V.A., Fedotov M.Y., Shienok A.M., Shelemba I.S., Babin S.A. Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // Journal of Sensors. – 2016. – V.2016. – Article ID 3230968.

Тезисы и труды конференций:

A15. Шелемба И.С. Волоконно-оптическая сенсорная система на основе брэгговских решеток // Материалы научно-практической конференции молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображения» – 2006 г. – Новосибирск. – С.108-109.

A16. Бабин С.А., Исмагулов А.Е., Каблуков С.И., Чуркин Д.В., Шелемба И.С. Перестраиваемый волоконный эрбиевый лазер для сенсорных применений // Материалы VIII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006» – 26-28 сентября 2006 г. – Новосибирск. – Т.2, С.234-236.

A17. Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Шелемба И.С. Интеррогатор массива брэгговских сенсоров на основе перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера // Труды Российского семинара по волоконным лазерам 2007. – 4-6 апреля 2007 г. – Новосибирск. – С.74-75.

A18. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Simple fiber Bragg grating sensors interrogator based on tunable Erbium-doped fiber laser // LPHYS'07. – August 20-24, 2007. – León, Mexico. – Book of Abstracts, P.271.

A19. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Combined time and wavelength multiplexing of fiber Bragg

- gratings using optical time domain reflectometer and fiber optic circulator // APCOM 2007. –September 15-18, 2007. – Vladivostok, Russia. – Adv. Program, paper 8.
- A20.** Babin S.A., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Tunable Erbium-doped fiber laser for interrogation of fiber Bragg grating sensors // APCOM 2007. – September 15-18, 2007. – Vladivostok, Russia. – Adv. Program, paper 10.
- A21.** Бабин С.А., Власов А.А., Шелемба И.С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решёток // Симпозиум «Нанофотоника 2007». – 18-22 сентября 2007 г. – Черногловка. – Сборник тезисов докладов, С.35.
- A22.** Шелемба И.С. Волоконно-оптическая система охраны периметров // Материалы школы-семинара «Инновации: от идеи до продукта». – 2008. – Новосибирск. – С.40-41.
- A23.** Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин, Бабин С.А., Шелемба И.С. Комбинированное спектрально-временное детектирование сигналов от волоконных брэгговских решеток с применением метода оптической временной рефлектометрии // Труды второго Российского семинара по волоконным лазерам. – 1-4 апреля 2008 г. – Саратов. – С.93-94.
- A24.** Shelemba I.S., Nikulin M.A., Vlasov A.A., Babin S.A. Comparison of different techniques for fiber Bragg grating sensor interrogation // 13th conference on Laser Optics 2008. – June 23-28, 2008. – St.-Petersburg, Russia. – Tech. Program, P.56, paper ThR1-p13.
- A25.** Babin S.A., Nikulin M.A., Shelemba I.S. Simple technique for nonlinearity compensation of a tunable Erbium laser // LPHYS'08. – June 30- July 4, 2008. – Trondheim, Norway. – Book of Abstracts, P.543.
- A26.** Исмагулов А.Е., Бабин С.А., Подивиллов Е.В., Федорук М.П., Шелемба И.С., Штырина О.В. Модуляционная неустойчивость узкополосных 100-нс импульсов при распространении в оптическом волокне в присутствии шума // Труды третьего Российского семинара по волоконным лазерам. – 31 марта - 2 апреля 2009. – Уфа. – С.71-73.
- A27.** Babin S.A., Ismagulov A.E., Kuznetsov A.G., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Fiber-optic sensor systems and their applications // The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMТII-2009). – 28 June-2 July, 2009. – Saint-Petersburg, Russia. – Proceedings of ISMТII-2009, V.3, P.3-011 – 3-015.
- A28.** Shelemba I.S., Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V. The role of modulation instability effect in the phase-sensitive OTDR sensor operation. // LPHYS'09. – July 13-17, 2009. – Barcelona, Spain. – Book of Abstracts, P.645.

- A29.** Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С. Распределенный оптоволоконный датчик температуры на основе комбинационного рассеяния света с WDM-фильтрацией сигнала // Труды всероссийской конференции по волоконной оптике. – 8-9 октября 2009 г. – Пермь. – С.100-101.
- A30.** Шелемба И.С., Харенко Д.С. Измерение распределения температуры статора турбогенератора при помощи датчиков на основе волоконных брэгговских решеток // Материалы молодежной конференции «Фотоника и оптические технологии». – 10-11 февраля 2010 г. – Новосибирск. – С.34.
- A31.** Шелемба И.С., Власов А.А., Харенко Д.С., Бабин С.А. Измерение температуры статора турбогенератора с помощью волоконных брэгговских датчиков // Материалы IV Российского семинара по волоконным лазерам. – 19-22 апреля 2010 г. – Ульяновск. – С.133.
- A32.** Терентьев Ю.А., Шелемба И.С. Измерение температуры токоведущих и конструктивных элементов ВТСП и НТСП объектов с помощью волоконно-оптических датчиков // Материалы Первой Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости. – 6-8 декабря 2011 г. – Москва. – С.80.
- A33.** Васюта Б.Н., Шелемба И.С. Система мониторинга технического состояния несущих конструкций центрального блока футбольного манежа в г. Новосибирске // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства». – 9-11 апреля 2013 г. – Новосибирск. – С.5.
- A34.** Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Zheleznova M.A., Shelemba I.S. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, Proceedings SPIE. – 2014. – V. 9157, article 9157D3.
- A35.** Кузнецов А.Г., Харенко Д.С., Бабин С.А., Цыденжапов И.Б., Шелемба И.С. Разработка и исследование сверхдлинных оптоволоконных распределённых систем измерения температуры на основе комбинационного рассеяния // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.165-166 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).
- A36.** Лисков Д.В., Оглезнев А.А., Лисовин И.Г., Рукавишников В.Е., Россик М.В., Шелемба И.С. Использование волоконно-оптических датчиков температуры при стендовых испытаниях газотурбинных установок // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.231 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

A37. Зырянов С.В., Шелемба И.С. Автоматизированный метод аподизации волоконных брэгговских решёток вращающимися экранами // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.231-233 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

A38. Скворцова В.А., Оглеzneв А.А., Шелемба И.С. Испытательный стенд для проверки волоконно-оптических систем термометрии распределенного типа в соответствии с международным стандартом качества IEC 61757 // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.236-237 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

A39. Гуляев А.П., Оглеzneв А.А., Салгаева У.О., Шелемба И.С. Оптический переключатель для опроса ВОД на основе фотонно-интегрального модуля, разработка и перспективы применения // Фотон–Экспресс. – 2017. – Т.6, №142. – С.242-243 (Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО-2017, г. Пермь).

Патенты:

A40. Бабин С.А., Кузнецов А. Г., Шелемба И. С., Никулин М.А. Волоконно-оптическое устройство для измерения температурного распределения (варианты). Патент РФ № 2413188 (приоритет от 09.04.2009), опубл. 27 февраля 2011 г.

A41. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Шалагин А.М., Бабин С.А., Шелемба И.С. Способ регистрации сигналов измерительных преобразователей на основе брэгговских решеток, записанных в едином волоконном световоде. Патент РФ № 2413259 (приоритет от 20 июля 2009 г.), опубл. 27 февраля 2011 г.

A42. Кузнецов А.Г., Шелемба И.С., Харенко Д.С. Волоконно-оптический линейный пожарный извещатель. Патент РФ № 2467397 (приоритет от 21.11.2011 г), опубл. 20.11.2012 г.

A43. Шелемба И.С., Харенко Д.С., Сычев И.В., Кузнецов А.Г. Способ определения температурного распределения вдоль оптоволоконной линии. Патент РФ № 2580151 (приоритет от 19.11.2014 г), опубл. 10.04.2016 г.

Список цитируемых работ

1. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview // Sensors and Actuators. – 2000. – V.82, №1-3. – P.40-61.
2. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы // Москва: Физматлит. – 2001. – 272 С.

3. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника – 2005. – Т.35, №12. – С.1085-1103.
4. Inaudi D., Glisic B. Fiber optic sensing for innovative oil & gas production and transport systems // 18th International Conference on Optical Fiber Sensors – OFS – 2006. – Paper №14.
5. Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brändle H. Optical fiber sensors for the electric power industry // Optics and Lasers in Engineering. – 2005. – V.43, №3-5. – P.511-526.
6. Lopez-Higuera J.M., Cobo L.R., Incera A.Q., Cobo A. Fiber optic sensors in structural health monitoring // Journal of Lightwave Technology. –2011. – V.29, №4. – P.587-608.
7. Ramakrishnan M. Optical fiber sensors for smart composite materials structures. Chapter in book: Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications // New York: CRC Press. – 2015. – P.491-520.
8. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., LeBlanc M. Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave technology. – 1997. – V.15, №8. – P.1442-1463.
9. Dakin J. P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector // Electronics Letters – 1985. – V.21, №13. – P.569-570.
10. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // Optics Letters. – 1994. – V.19, №3. – P.225-227.
11. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // Optical Fiber Technology. – 2003. – V.9, №2. – P.57-79.