

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки ИАиЭ СО РАН

член-корреспондент РАН

С.А. Бабин

«5» февраля 2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматки и электрметрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 «Оптика», выполнена в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН и ООО «Инверсия-Сенсор».

В период подготовки диссертации соискатель Шелемба Иван Сергеевич работал в ИАиЭ в должности инженера, а также в ООО «Инверсия-Сенсор» в должностях директора и главного конструктора.

В 2008 году окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по специальности физика. В 2011 г. окончил аспирантуру ИАиЭ СО РАН.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2011 году ИАиЭ СО РАН.

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

Диссертация «Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение» была рассмотрена на межлабораторном семинаре учебно-научного центра «Квантовая оптика» ИАиЭ СО РАН 14 декабря 2017 года.

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, академик РАН, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, чл.-корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Суровцев Николай Владимирович, чл.-корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Корольков Виктор Павлович, д.т.н., ИАиЭ СО РАН

Ильичёв Леонид Вениаминович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Каблуков Сергей Иванович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Плеханов Александр Иванович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Чаповский Павел Львович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Потатуркин Олег Иосифович, д.т.н., ИАиЭ СО РАН

Шапиро Давид Абрамович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Фрумин Леонид Лазаревич, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Микерин Сергей Львович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Достовалов Александр Владимирович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Злобина Екатерина Алексеевна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

и другие сотрудники ИАиЭ СО РАН и ИФП СО РАН.

В обсуждении приняли участие д.ф.-м.н. Шалагин А.М., д.ф.-м.н. Шапиро Д.А., д.ф.-м.н. Чаповский П.Л., д.т.н. Корольков В.П. и другие. Вопросы касались личного вклада соискателя, научной новизны, сравнения полученных результатов с мировыми достижениями. Высказанные замечания касались формулировок защищаемых положений, стиля подачи материала в отдельных

параграфах и отсутствия метрологических характеристик в одном из параграфов.

По результатам рассмотрения диссертации «Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение» на межлабораторном семинаре Учебно-научного центра «Квантовая оптика» ИАиЭ СО РАН принято следующее заключение:

Актуальность работы

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. Так, волоконные датчики используются в угле-, нефте- и газодобыче для измерения температуры и давления в скважинах, а также для мониторинга трубопроводов. Волоконные датчики температуры могут применяться в системах пожарной сигнализации различных сооружений, а также в энергетике. Датчики деформаций и вибраций на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) используются для мониторинга элементов конструкций в капитальном строительстве и объектах энергетике. В атомной энергетике используются радиационно-стойкие датчики. Кроме того, в последнее время активно развиваются технологии внедрения датчиков в композитные материалы для онлайн-мониторинга состояния изделий из этих материалов (в объектах инфраструктуры, авиастроении, космической технике и т.д.).

Оптоволоконные датчики можно условно разделить на две группы: точечные, где чувствительным элементом является ВБР, и распределённые, где в качестве чувствительной среды используется вся длина оптического волокна. Масштабы практического использования волоконных сенсорных систем

ограничены достаточно высокой ценой оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков, как в случае точечных датчиков, так и в случае распределенных. Кроме того, для повышения надежности и долговременной стабильности работы сенсорной системы, включая устройство опроса, требуется ее полностью волоконная реализация.

Одним из возможных вариантов реализации волоконной схемы опроса точечных датчиков является использование узкополосного непрерывного перестраиваемого волоконного лазера и фотодетектора, на который поступает отраженное от ВБР излучение. Для опроса распределенной сенсорной системы на основе комбинационного рассеяния перспективным представляется использование импульсного эрбиевого лазера и волоконных фильтров на основе ВБР и волоконных ответвителей.

Исходя из этого, цель работы Шелембы И.С. формулировалась как разработка методов опроса распределенных волоконных сенсорных систем (как на основе массива ВБР датчиков, так и на основе комбинационного рассеяния света) в полностью волоконном варианте, максимально пригодных для практических применений.

Для достижения этой цели перед Шелембой И.С. были поставлены следующие задачи: разработка перестраиваемого эрбиевого лазера на основе перестраиваемой ВБР; разработка методов опроса массива ВБР датчиков; разработка волоконной схемы и методов опроса распределённого датчика на основе комбинационного рассеяния света в волокне; применение реализованных сенсорных систем на практике.

Личное участие соискателя

В ходе выполнения работ Шелемба И.С. принимал активное участие в выборе направления исследований и постановке задач, проведении экспериментов, обработке результатов и их обсуждении, подготовке статей для публикаций и внедрении. При выполнении диссертационной работы Шелемба И.С. проявил себя квалифицированным научным работником, способным

самостоятельно решать сложные задачи и проводить исследования на высоком уровне.

Новизна

В диссертации получены следующие основные научные результаты:

1. В диссертационной работе предложена и реализована полностью волоконная схема опроса брэгговских датчиков на основе эрбиевого лазера с перестраиваемой ВБР, для устранения нелинейности которой применялся интерферометра 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 $0.5-1^{\circ}\text{C}$.
2. Предложена и реализована 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.
3. Предложена и реализована схема опроса распределенного датчика температуры на основе комбинационного рассеяния света в одномодовом и многомодовом волокне с использованием волоконного импульсного лазера. В схеме применен 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 ограничено полосой пропускания фотодетектора и составляет ~10 м.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям, экспериментальным и теоретическим результатам других работ. Все измерения проводились с помощью точных калиброванных приборов. При изучении спектральных характеристик излучения использовались современные быстрые приборы. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы полученными в работе экспериментальными результатами.

Практическая значимость

Результаты диссертации имеют практическую значимость:

Оптоволоконные датчики температуры были 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 описанных 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 счет

своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-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 распределенного 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 было оснащено более 100 скважин.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 01.04.05 «Оптика», так как область исследования диссертации относится к оптике волоконных световодов.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Результаты работ по теме диссертации были доложены на следующих конференциях и семинарах: 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); 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. – Тронхейм, 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); Молодежная 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 диссертационной работы достаточно подробно и в полном объеме отражены в 11 опубликованных печатных работах в российских рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. 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. – Pp.1340-1344.

2. 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.

3. 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.

4. 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. – Pp. 1301-1304.

5. 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.

6. 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.

7. 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. – N.46, №. – С.70.

8. 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.

9. Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Shelemba I.S. and Shtyrina O.V. Modulation instability at propagation of narrowband 100 ns pulses in optical fibers of various types // Laser Physics. – 2010. – V.20, №2. – Pp. 334-340.

10. 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.

11. 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.

Диссертация «Методы опроса распределенных волоконно-оптических измерительных систем и их практическое применение» Шелембы Ивана Сергеевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Председатель семинара
академик РАН



Шалагин А. М.