

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.7.068

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ*

С. А. Бабин¹, А. Г. Кузнецов¹, И. С. Шелемба^{1, 2}

¹ Учреждение Российской академии наук

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: babin@iae.nsk.su

² ООО «Инверсия-Сенсор»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

Сравниваются два типа оптоволоконных измерительных систем: линия с большим количеством точечных датчиков на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР), опрашиваемых с помощью непрерывного перестраиваемого волоконного лазера, и распределённая система на основе оптической временной рефлектометрии (ОВР) комбинационного рассеяния (КР) излучения импульсного волоконного лазера. Предложены и реализованы методы повышения точности измерений с помощью дополнительной калибровки сдвига брэгговской длины волны по волоконному интерферометру в ВБР-системе и спектральной фильтрации стоксовой и антистоксовой компонент КР с помощью спектрально-селективных волоконных ответвителей в ОВР-системе. Проведён анализ физических эффектов, влияющих на параметры систем, их сравнение и оптимизация для практических приложений мониторинга распределения температуры в турбогенераторах и нефтяных скважинах.

Ключевые слова: волоконные датчики, распределённые системы, ВБР, рефлектометр, комбинационное рассеяние.

Введение. Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Оптоволоконные датчики характеризуются малым весом и размером, отсутствием электричества в измерительном тракте, нечувствительностью к электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред и достаточно просто интегрируются в распределённые измерительные системы. Благодаря этим уникальным свойствам они широко используются при решении различных научных и практических задач, в которых необходимо измерять температуру, деформации и другие параметры протяжённых объектов [1]. Однако масштабы практического применения волоконных сенсорных систем ограничены достаточно высокой ценой оптоэлектронного устройства опроса волоконных датчиков. С этой точки зрения создание новых эффективных и недорогих устройств является актуальной и важной задачей. В данной работе представлены последние достижения авторов в области распределённых систем измерения температуры для различных применений.

Оптоволоконные датчики можно условно разделить на две группы: точечные и распределённые. Наиболее распространённый тип точечных датчиков основан на использовании

*Работа выполнена при поддержке проекта интеграционной программы Сибирского отделения РАН и контракта Министерства образования и науки РФ.

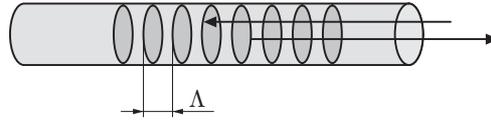


Рис. 1. Волоконная брэгговская решётка

волоконной брэгговской решётки (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого воздействия в оптический сигнал [2]. ВБР-датчик, отражающий свет с определённой длиной волны, измеряет значение температуры (или деформации) только в той точке оптического волокна, где находится ВБР. Для измерения в нескольких точках, необходимо сформировать в оптическом волокне несколько ВБР. В отличие от точечных в распределённых волоконных датчиках в качестве чувствительной среды используется вся длина оптического волокна. Измеряемым оптическим сигналом служит рассеянный свет (за счёт эффектов Рэля, Бриллюэна или Рамана), а метод оптической временной рефлектометрии (ОВР) позволяет измерять распределение температуры, деформации или другого внешнего воздействия вдоль оптического волокна [3, 4]. Измерительные системы, основанные на рассеянии, могут уступать распределённым системам на базе большого количества точечных ВБР-датчиков в пространственном разрешении и чувствительности, однако имеют такое важное преимущество, как пространственная непрерывность измеряемого параметра. Далее проведём сравнительный анализ параметров разработанных датчиков температуры на основе ВБР и ОВР комбинационного (рамановского) рассеяния и соответствующих преимуществ для конкретных применений.

Распределённая система на основе ВБР. Волоконная брэгговская решётка представляет собой одномерную решётку показателя преломления с периодом $\Lambda \sim 300\text{--}500$ нм (рис. 1), наведённую в сердцевине волокна ультрафиолетовым лазерным излучением за счёт фотомодификации её структуры на длине волокна порядка 1 мм [5]. Основным свойством ВБР является узкополосное отражение излучения, распространяющегося вдоль волокна на так называемой брэгговской длине волны, которая определяется условием конструктивной интерференции пучков, отражённых от разных слоёв:

$$\lambda_B = 2\Lambda(T, \varepsilon)n(T), \quad (1)$$

где n — показатель преломления сердцевины волокна; T — температура; ε — относительная деформация решётки. Внешние воздействия (T, ε) на решётку приводят к сдвигу брэгговского пика. Основным принципом работы датчиков на основе ВБР является измерение сдвига брэгговского спектрального максимума как функции температуры T или деформации ε решётки. Применение нескольких ВБР-датчиков в одном оптическом волокне возможно, например, путём записи в разных точках волокна решёток с различными положениями брэгговских пиков на разных длинах волн (рис. 2). Для записи массива ВБР использовалась вторая гармоника аргонового лазера ($\lambda_{UV} = 244$ нм) с пространственной модуляцией интенсивности, формируемой в интерферометре Ллойда (см., например, [6]). Меняя угол Θ между интерферирующими пучками, можно изменять период решётки $\Lambda = \lambda_{UV}/2 \sin \Theta$ в широком диапазоне — таким образом записывались ВБР с последовательным сдвигом брэгговской длины волны (1) на 1 нм в области окна прозрачности волокна ($\sim 1,55$ мкм) (см. рис. 2).

Известно большое количество методов измерения сдвига брэгговских максимумов. Чаще всего используются широкополосный источник излучения и оптический анализатор спектра или узкополосный эрбиевый лазер с перестройкой длины волны излучения в области 1,52–1,58 мкм. Эти методы позволяют измерять положения брэгговских максимумов с точностью до ~ 1 пм, что соответствует примерно $0,1^\circ\text{C}$, но их высокая стоимость ограничивает круг применений.

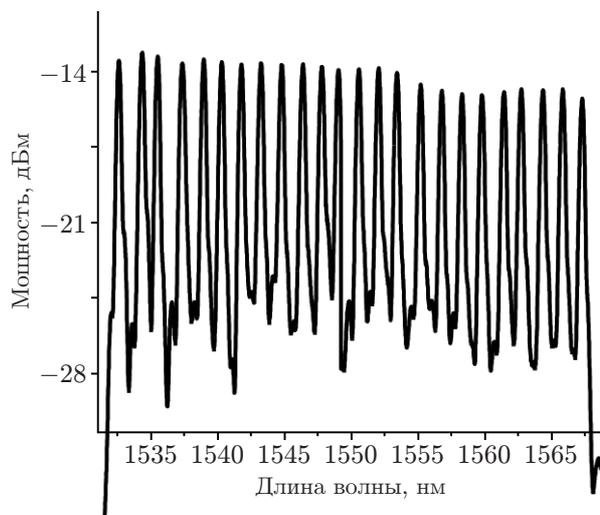


Рис. 2. Спектр отражения массива брэгговских датчиков

В данной работе реализовано устройство опроса на основе относительного простого перестраиваемого эрбиевого лазера (рис. 3), обеспечивающее точность измерения температуры на уровне 1°C без использования дорогостоящих оптоволоконных компонент [7]. Сканирование длины волны генерации лазера осуществляется с помощью перестраиваемой брэгговской решётки, длина волны отражения которой меняется за счёт аксиального сжатия ε (1). Диапазон перестройки составил 45 нм при шаге 4 пм. Основная проблема применения перестраиваемой решётки состоит в нелинейности её перестроечной кривой. Различная величина шагов актюатора, а также микроизгибы волокна в ферруле могут приводить к накоплению ошибки определения длины волны по мере перестройки ВБР, которая может превышать 0,1 нм при перестройке длины волны на 20 нм. Термостабилизированные реперные брэгговские решётки и интерферометр Маха — Цандера с областью свободной дисперсии ~ 30 ГГц (что составляет $\sim 0,3$ нм в области 1,55 мкм) позволяют компенсировать этот эффект (рис. 4). Принцип метода состоит в том, что ошибка при перестройке не накапливается, а «обнуляется» через каждые 0,3 нм. При этом после компьютерной обработки спектра ошибка определения резонансной длины волны ВБР не превышала 15 пм, что с учётом коэффициента преобразования (10–30 пм/ $^\circ\text{C}$ для разных типов датчиков) соответствует точности измерения температуры $\sim 1^\circ\text{C}$. Данный метод предоставляет возможность реализовать устройство, способное опрашивать до 90 датчиков с точностью 1°C .

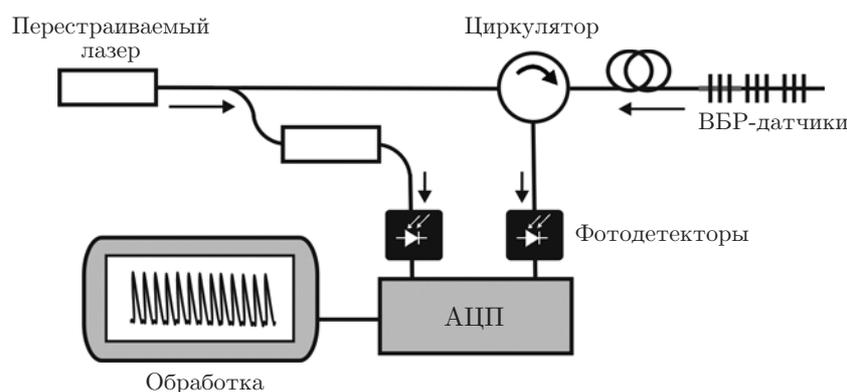


Рис. 3. Схема опроса ВБР-датчиков на основе эрбиевого лазера

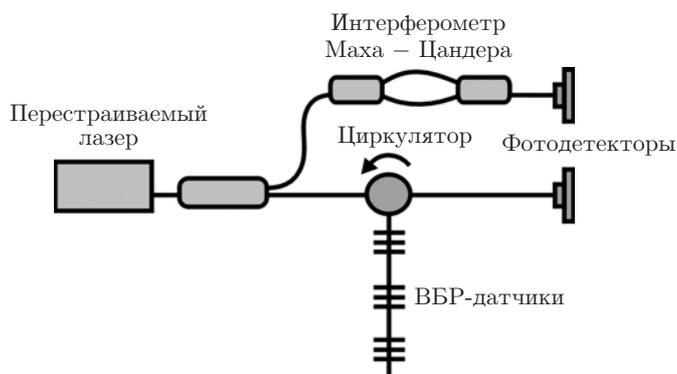


Рис. 4. Схема опроса ВБР-датчиков, использующая интерферометр Маха — Цандера

ВБР-датчики могут применяться для решения различных технических проблем. Так, для увеличения эффективности нефтедобычи требуется измерение распределения температуры по глубине скважины, которое может быть проведено с помощью оптоволоконных датчиков. Другой пример — необходимость мониторинга температуры роликов шахтных конвейеров или элементов электрических машин для повышения уровня безопасности. Все эти задачи не могут быть решены с помощью традиционных электрических датчиков по ряду причин: агрессивная среда, высокие интенсивности электромагнитного поля или запрет на использование электричества на некоторых объектах. Одной из потенциальных сфер применения ВБР-датчиков является мониторинг строительных объектов — измерение деформации и температуры мостов, дамб, высотных и уникальных зданий и их элементов. В то время как задачи нефтегазовой отрасли не требуют высокого пространственного разрешения, оно крайне важно для контроля элементов генераторов, конвейеров и зданий. При использовании ВБР-датчиков пространственное разрешение определяется длиной решётки и может составлять менее 1 см. При этом возможность простого мультиплексирования — размещения множества датчиков в одном волокне — позволяет производить с помощью ВБР распределённые измерения.

Одним из наиболее важных параметров ВБР-датчиков является их прочность. Контакт с агрессивными средами, а также деформации, возникающие из-за высокого термального расширения объекта, или другие эффекты могут повредить волокно. Как показал опыт оснащения промышленного турбогенератора, ВБР-датчики при правильном монтаже могут выдерживать достаточно жёсткие условия [8]. Решётки были закреплены на медном стержне обмотки статора. Затем стержень покрывался несколькими слоями изоляции и пропитывался в эпоксидном компаунде при температуре 65 °С и давлении 10 атм. После пропитки для затвердевания компаунда статор запекался 16 ч при температуре 165 °С. Во время затвердевания произошёл сдвиг калибровочных кривых датчиков, обусловленный сжатием решёток, однако практически все датчики остались невредимыми и исправно работали после перекалибровки. Это позволило впервые измерить распределение температуры стержней статора на работающем турбогенераторе.

Распределённый температурный датчик на основе комбинационного рассеяния света. Среди множества распределённых волоконных датчиков температуры системы на базе комбинационного рассеяния (КР) представляют особый интерес. Такой датчик основан на методе оптической временной рефлектометрии и спектральном анализе излучения лазерного импульсного источника (длительностью 10–200 нс), рассеянного в оптическом волокне. Была проделана работа по исследованию полностью волоконных схем эрбиевых лазеров с модуляцией добротности резонатора (Q-switched лазеры) в кольцевой схеме задающего осциллятора с эрбиевым усилителем мощности. Выходные параметры

лазера (мощность, длительность импульса и ширина спектральной линии) были оптимизированы для достижения наилучших пространственного и температурного разрешений сенсорной системы на основе КР.

Известно, что комбинационное рассеяние света сопровождается появлением дополнительных сдвинутых по частоте спектральных компонент. Количество и спектральное положение этих линий зависят от структурных характеристик рассеивающего вещества. В КР происходит обмен энергией между падающим фотоном и молекулой вещества: если молекула переходит из основного состояния в возбуждённое, то рассеянный фотон испытывает «красное» смещение спектра и генерируется стоксова компонента КР (рис. 5). Возможен также и обратный процесс, когда структурная молекула теряет энергию и перерассеянный фотон с более высокой энергией генерирует антистоксову линию с «синим» смещением спектра относительно линии накачки. Очевидно, что заселённость возбуждённого уровня напрямую зависит от температуры вещества, а значит, интенсивность антистоксовой компоненты будет проявлять температурную зависимость. Таким образом, регистрируя временную динамику интенсивности антистоксовой компоненты КР при зондировании импульсным излучением, с помощью этого датчика можно проводить измерения температуры вдоль всего волокна. Отношение интенсивностей стоксовой I_s и антистоксовой I_{as} компонент описывается известной формулой [9]

$$\frac{I_{as}(T)}{I_s(T)} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp \left(- \frac{h\nu}{k_B T} \right), \quad (2)$$

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.

Спектр КР в одномодовом оптоволокне SMF-28, измеренный в обратном направлении по отношению к распространению лазерного импульса, приведён на рис. 5. Видно, что интенсивность антистоксовой линии очень мала (на 30 дБ слабее амплитуды упругого рэлеевского рассеяния), и поэтому регистрация отношения интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент является сложной задачей. Кроме этого мощность зондирующего излучения не должна превышать нескольких ватт, чтобы избежать проявления таких нелинейных эффектов, как вынужденное комбинационное (рамановское) рассеяние и вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна. Всё это требует особенно тщательного подхода к выбору метода спектральной фильтрации полезного сигнала. Нами был

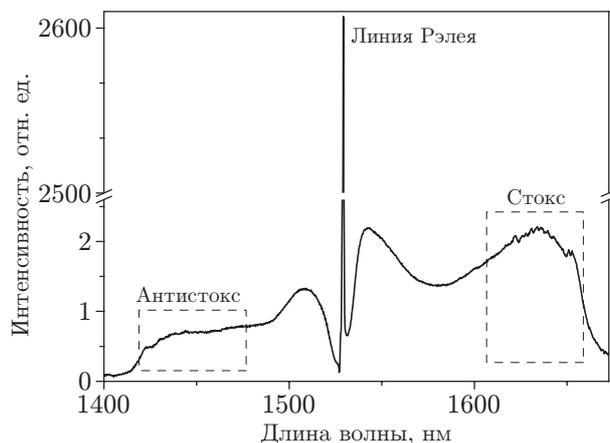


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния в оптоволокне SMF-28

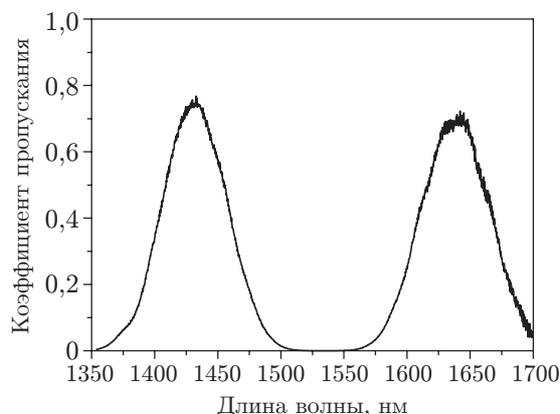


Рис. 6. Спектр пропускания фильтра

разработан новый метод фильтрации на основе волоконных брэгговских решёток и направленных спектрально-селективных ответвителей [10], который позволил производить измерения интенсивности компонент КР в широком спектральном диапазоне с минимальными потерями, при этом чувствительности обычного InGaAs-фотоприёмника оказалось достаточно. Данный фильтр подавлял центральную область спектра на длине волны 1529 нм и пропускал антистоксову и стоксову линии КР, центрированные на 1430 и 1630 нм соответственно, в полосе шириной 30–50 нм (рис. 6), каждая из которых в дальнейшем направлялась на соответствующий регистрирующий фотодиод (рис. 7). Для того чтобы минимизировать шумы фотодетектора, требуется усреднение регистрируемых данных (~100-кратное). Как было показано в эксперименте, чувствительность разработанного датчика по температуре составляет несколько градусов для одномодовой волоконной линии протяжённостью ~10 км (рис. 8, 9). Использование лавинных фотодиодов вместо InGaAs позволит существенно улучшить точность измерения температуры. Пространственное разрешение составляет ~10 м, ограничено полосой пропускания фотодетектора (10 МГц) и может быть в дальнейшем улучшено до значений единиц метров, определяющихся длительностью импульса зондирующего излучения импульсного волоконного лазера.

Распределённые волоконные датчики на основе КР могут успешно применяться в областях, где требуется мониторинг протяжённых объектов: измерение температуры в скважинах, высотных зданиях, в том числе для пожарной сигнализации, и других аналогичных объектах. Кроме этого ещё одним преимуществом таких датчиков является то, что они не требуют дорогостоящих чувствительных к температуре компонент и могут быть использованы на основе стандартного телекоммуникационного волокна.

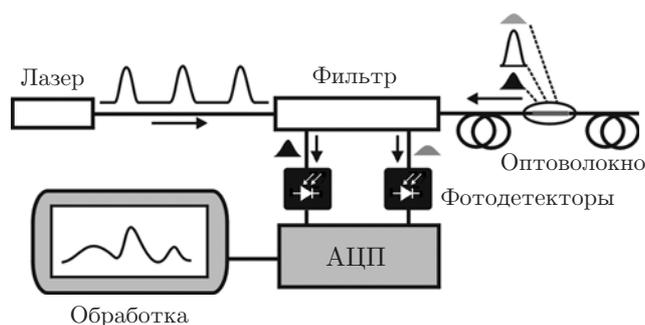


Рис. 7. Схема распределённого датчика температуры

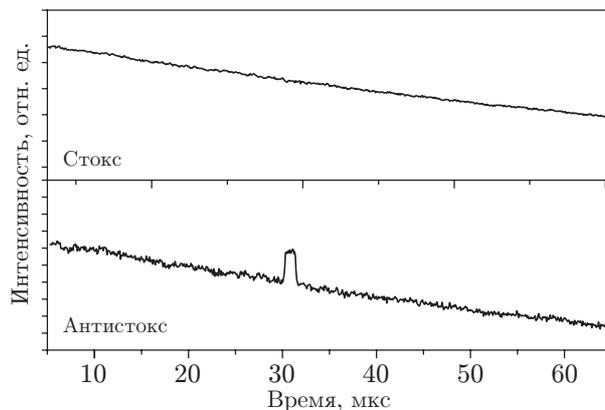


Рис. 8. Временная зависимость интенсивностей стоксовой и анти-стоксовой компонент

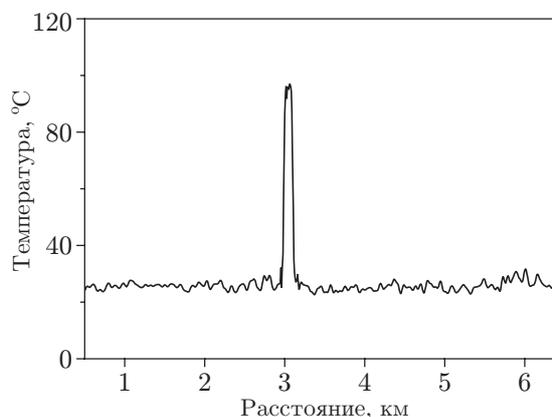


Рис. 9. Распределение температуры, рассчитанное по рис. 8

Заключение. Таким образом, в представленной работе созданы системы мониторинга на основе волоконных брэгговских решёток и комбинационного рассеяния света в волокне, позволяющие измерять температуру в определённых точках либо непрерывно вдоль всего волокна. Проанализированы физические эффекты, влияющие на точность измерения данных систем. При опросе точечных брэгговских датчиков с помощью простого эрбиевого волоконного лазера с перестраиваемой ВБР оказывается существенным эффект нелинейности перестроечной кривой, который устраняется посредством реперной термостабилизированной ВБР и интерферометра Маха — Цандера для калибровки сдвигов. В результате продемонстрирована точность измерения температуры 1°C для 90 ВБР-датчиков, записанных в одной волоконной линии. Для распределённого температурного датчика на основе КР света в волокне использование направленных ответвителей в качестве спектральных фильтров дало возможность улучшить отношение сигнал/шум регистрируемого сигнала, и в результате температурное разрешение составило несколько единиц градусов Цельсия вдоль 10-километровой волоконной линии. Пространственное разрешение (~ 10 м) ограничивается быстродействием фотодетектора (10 МГц) и может быть улучшено до нескольких метров.

Метод рефлектометрии КР лучше подходит для условий протяжённых линий, в которых существенна пространственная непрерывность измерений вдоль всей линии, например в противопожарных системах, тогда как метод ВБР-датчиков обладает преимуществами в случаях, когда необходима высокая точность и пространственная локализация измере-

мых значений температуры, например в турбогенераторах. Надёжность и долговременная стабильность ВБР-датчиков продемонстрирована на практике при температурном мониторинге промышленных турбогенераторов в жёстких условиях эксплуатации. Кроме этого, подобные сенсорные системы могут быть успешно применены в нефте- и газодобыче, угольной отрасли, медицине и других областях, особенности которых не позволяют использовать традиционные методы температурного мониторинга.

Авторы выражают благодарность А. А. Власову и М. А. Никулину за ценный вклад в создание нестандартных волоконных компонент, Д. С. Харенко за техническое содействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Grattan K. T. V., Sun T.** Fiber optic sensor technology: an overview // *Sensors and Actuators A*. 2000. **82**, Is. 1–3. P. 40–61.
2. **Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J. et al.** Fiber grating sensors // *Journ. Lightwave Technol.* 1997. **15**, Is. 8. P. 1442–1463.
3. **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 // *Electron. Lett.* 1985. **21**, N 13. P. 569–570.
4. **Juškaitis R., Mamedov A. M., Potapov V. T., Shatalin S. V.** Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // *Opt. Lett.* 1994. **19**, Is. 3. P. 225–227.
5. **Kashyap R.** Fiber Bragg gratings. N. Y.: Academic Press, 1999. 458 p.
6. **Абдуллина С. Р., Власов А. А., Бабин С. А.** Сглаживание спектра волоконных брэгговских решёток в схеме записи с интерферометром Ллойда // *Квантовая электроника*. 2010. **40**, № 3. С. 259–263.
7. **Babin S. A., Kablukov S. I., Shelemba I. S., Vlasov A. A.** An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser // *Laser Phys.* 2007. **17**, N 11. P. 1340–1344.
8. **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.
9. **Long D. A.** Raman spectroscopy. N. Y.: McGraw-Hill, 1977. 289 p.
10. **Кузнецов А. Г., Бабин С. А., Шелемба И. С.** Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // *Квантовая электроника*. 2009. **39**, № 11. С. 1078–1081.

Поступила в редакцию 20 мая 2010 г.