УДК 681.785:681.7.068

Квазираспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры рециркуляционного типа на основе технологии спектрального мультиплексирования

Поляков А.В., Прокопенкова Т.Д.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 18.12.2016
Принята к печати 20.03.2017

Обеспечение качественной и надежной работы, а также температурный мониторинг современных систем напрямую связаны с использованием инновационных оптоволоконных технологий на основе концепции так называемых распределенных и квазираспределенных датчиков, имеющих большие линейные размеры, в которых оптические волокна являются одновременно и чувствительным элементом, и каналом передачи данных. Существующие волоконно-оптические датчики на основе вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна имеют относительно высокую погрешность измерений, длительную и сложную методику измерений, высокую стоимость. Цель данной работы состояла в разработке структуры автоматизированной квазираспределенной волоконно-оптической системы измерения температуры рециркуляционного типа с использованием технологии спектрального мультиплексирования.

Метод измерений основан на регистрации возникающих под воздействием температуры изменений частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов на соседних длинах волн. При этом происходит периодическое восстановление сигнала по форме, амплитуде и длительности. Чувствительными элементами являются отрезки многомодового кварцевого волоконного световода с металлическим покрытием, разделенные спектрально-селективными элементами, в качестве которых предлагается использовать дихроичные зеркала. С помощью разработанной математической модели, учитывающей температурную зависимость коэффициента линейного расширения и модуля Юнга волокна, спектральную и температурную зависимость показателя преломления, химический состав волокна, тип металлического покрытия рассчитана функция отклика системы, позволяющая оценить чувствительность и погрешность измерений.

В результате проведенных исследований определены: количество измерительных секций (8), максимальная измеряемая температура (500 °С), чувствительность метода (3,28 Гц/°С), погрешность измерений (±0,2 °С), а также оптимальное время начала измерений после запуска циркуляции (15 мин) и времени счета частотомера (1 с). Проведенные оценки показали, что по совокупности технических характеристик предлагаемая измерительная система может превзойти существующие аналоги.

Ключевые слова: волоконный световод, термические методы, квазираспределенный датчик температуры, частота рециркуляции, технические характеристики.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

Адрес для переписки:
Поляков А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Address for correspondence:
Polyakov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: polyakov@bsu.by

Для цитирования:
Поляков А.В., Прокопенкова Т.Д.
Квазираспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры рециркуляционного типа на основе технологии спектрального мультиплексирования.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 131–141
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

For citation:
Polyakov A.V., Prokopenkova T.D.
[Quasi-distributed fiber-optic recirculating system for temperature measurement based on wavelength-division multiplexing technologies].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 131–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

Quasi-distributed fiber-optic recirculating system for temperature measurement based on wavelength-division multiplexing technologies

Polyakov A.V., Prokopenkova T.D.

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 18.12.2016
Accepted for publication 20.03.2017

Abstract

Providing quality and reliable operation as well as temperature monitoring of modern systems are directly related on the use of innovative fiber optic technology based on the concept of so-called distributed and quasi-distributed sensors having large linear dimensions, in which the optical fiber is both sensor and data channel. Existing fiber optic sensors based on stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering have relatively high measurement error, long and complicated measurement method, high cost. The purpose of this paper was to develop an automated quasi-distributed fiber optic recirculating temperature measurement system using wavelength division multiplexing technology. Measurement method based on the registration arising due to temperature changes of the frequency of single optical pulses recirculating at adjacent wavelengths. Thus there is a periodic signal restoration on waveform, amplitude and duration. The sensing element is a segment of a multimode silica fiber coated with metal, separated spectrally selective elements, which are mainly offered to use dichroic mirrors. With the help of the developed mathematical model that takes into account the temperature dependence of the coefficient of linear expansion and Young's modulus of the fiber, the spectral and temperature dependence of the refractive index, the chemical composition of the fibers, the type of metal coating system response function was calculated, which allows to evaluate the sensitivity and measurement accuracy. These studies determined: number of measuring sections (8), the maximal measured temperature (500 °C), the sensitivity (3,28 Hz/°C), the measurement error (±0,2 °C), and the optimum beginning time measurement after starting circulation (15 min), and counting time of the frequency meter (1 s). Carried out estimations have shown that the proposed measuring system can outperform existing analogues on set specifications.

Keywords: optical fiber, thermal methods, quasi-distributed temperature sensor, recirculating frequency, technical characteristics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

Адрес для переписки:
Поляков А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Address for correspondence:
Polyakov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: polyakov@bsu.by

Для цитирования:
Поляков А.В., Прокопенкова Т.Д.
Квазираспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры рециркуляционного типа на основе технологии спектрального мультиплексирования.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 131–141.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

For citation:
Polyakov A.V., Prokopenkova T.D.
[Quasi-distributed fiber-optic recirculating system for temperature measurement based on wavelength-division multiplexing technologies].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 131–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141

Введение

Оптоволоконные технологии используются в различных областях техники, составляя основу не только средств передачи информации, но и разнообразных устройств измерения и контроля. На основе данных технологий разработаны различные измерительные системы, которые, обладая высокой точностью, превосходят электронные устройства того же назначения в части стабильности и термостойкости. Измерительные элементы (сенсоры) таких систем не подвержены влиянию магнитных и электрических полей и стойки по отношению к вибрации, ударам, а также к воздействию агрессивных сред.

При создании современных систем потребовалась разработка принципиально новых методов и устройств для измерения разнообразных производственных параметров по всей длине исследуемого объекта. Подобные измерения стали принципиально возможными лишь с появлением концепции так называемых распределенных и квазираспределенных датчиков, имеющих большие линейные размеры, на основе оптических волокон, которые являются одновременно и чувствительным элементом, и каналом передачи данных. Среди них существенное место занимают распределенные датчики для температурного профилирования [1]. К недостаткам распределенных волоконно-оптических датчиков на основе вынужденного комбинационного рассеяния можно отнести следующие особенности: 1) наряду с комбинационным в оптическом волокне возбуждается рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, накладывающееся своими более высокими порядками на измеряемые спектральные составляющие; 2) малая величина коэффициента комбинационного рассеяния, что требует применения длительного накопления сигнала и использования оптических импульсов большой мощности, поскольку порог возникновения вынужденного комбинационного рассеяния составляет 500 мВт – 1 Вт; 3) погрешность измерений температуры составляет не менее 1 °С. Недостатками волоконно-оптического датчика температуры (ВОДТ) на основе вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна являются: 1) относительно высокая погрешность измерений, не менее 1 °С; 2) длительное время измерения, которое может исчисляться минутами, 3) достаточно сложные методика проведения измерений и алгоритм обработки данных; 4) высокая стоимость установки.

Для повышения точности измерений посредством волоконно-оптического датчика (ВОД) предлагается отказаться от аналоговой модуляции какого-нибудь из параметров потока излучения и перейти к неаналоговой (дискретной) его модуляции, вводя тем самым в поток излучения новые, неоптические, параметры. Одним из перспективных путей решения подобных задач является переход к частотному (временному) представлению измеряемой величины, использующий зависимость времени задержки оптического излучения в световоде от воздействующих измеряемых физических величин. Высокая чувствительность частоты рециркуляции в замкнутой оптоэлектронной системе к малым внешним воздействиям на волоконный световод (ВС) позволила реализовать новый принцип частотного представления информации.

Структура квазираспределенной рециркуляционной оптоволоконной системы измерения температуры

Для одновременного измерения температуры на нескольких требуемых участках контролируемого объекта нами разработана структура квазираспределенного ВОДТ со спектральным разделением информационных каналов. Принцип функционирования данного ВОДТ основан на зависимости времени задержки распространения оптического импульса в ВС от температуры. Рост температуры световода приводит к увеличению его геометрической длины L (продольной деформации), изменению показателя преломления n и, соответственно, изменению частоты рециркуляции. Одновременно с продольной деформацией ВС происходит изменение его диаметра (уменьшение при растяжении и увеличение при сжатии), т.е. возникает поперечная деформация. Этим объясняется эффект фотоупругости, который также приводит к изменению показателя преломления.

Сущность функционирования ВОД, схема которого представлена на рисунке 1, заключается в организации рециркуляции одиночных оптических импульсов с периодической регенерацией одновременно на нескольких длинах волн по одному световоду. Устройство работает следующим образом. По сигналу с блока управления, обработки и отображения данных БУО блок регенерации БРГ генерирует стандартные по амплитуде, длительности и форме началь-

ные импульсы и запускает процесс циркуляции. Данные импульсы тока накачки после усиления модулятором тока МТ поступают на входы линейки излучателей, представляющие полупроводниковые инжекционные лазеры ИЛ, генерирующие излучение на различных длинах волн. Для уменьшения задержки между импульсом тока накачки и излучением инжекционного лазера последние смещаются в предпороговую область генерации постоянной составляющей тока накачки. Импульсы оптического излучения на разных длинах волн от инжекционных лазеров объединяются в один световод мультиплексором *MUX* и через направленный ответвитель НО вводятся в волоконный световод ВС, разделенный на секции спектрально-селективными элементами. Селективные элементы настроены таким образом, что отражают излучение на определенной длине волны и пропускают все остальные, при этом излучение на последней длине волны просто отражается от зеркального отражателя О. Отраженное излучение после некоторой задержки τ_0, определяемой оптической длиной оптоволоконной секции, с помощью направленного ответвителя направляется на демультиплексор *DEMUX*, который пространственно разделяет спектральные каналы, а затем регистрируется линейкой фотоприемников ФП. Сигнал с фотоприемников поступает на электронные усилители, которые обеспечивают уровень сигнала на входе пороговых устройств (компараторов) ПУ U_a не менее 4 мВ, поскольку при пороге срабатывания компаратора $U_{th} = 0{,}5U_0 < 2$ мВ возможно ложное срабатывание по уровню шумов. На выходе ПУ в момент пересечения сигналом порогового уровня формируются импульсы, управляющие блоком регенерации, который снова формирует стандартные по амплитуде, длительности и форме импульсы. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается.

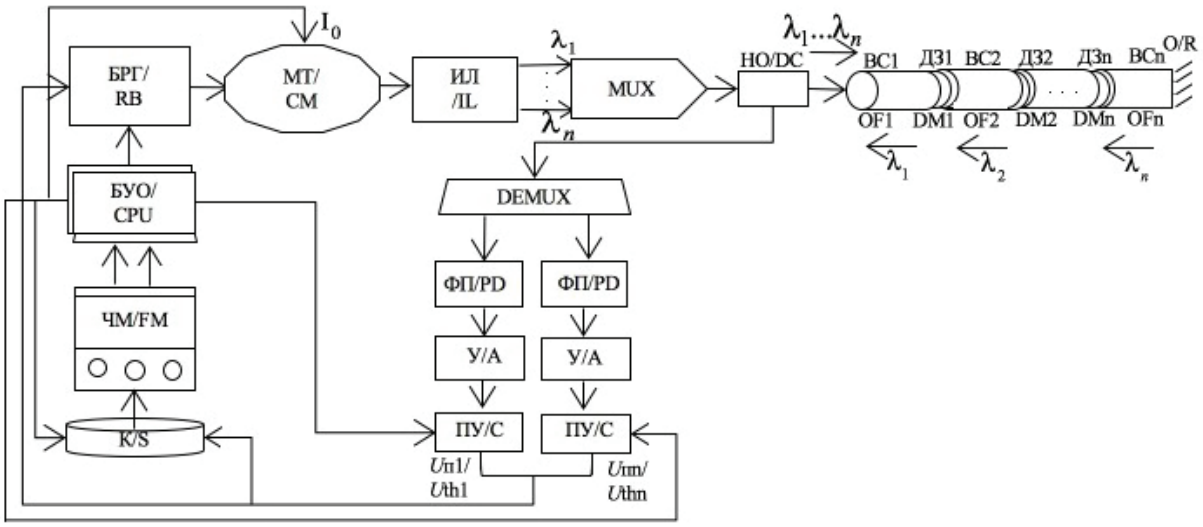


Рисунок 1 – Схема квазираспределенного волоконно-оптического датчика температуры рециркуляционного типа: БУО – блок управления, обработки и отображения информации; БРГ – блок регенерации; МТ – модулятор тока; ИЛ – линейка инжекционных лазеров; *MUX* – мультиплексор; НО – направленный ответвитель; ВС – волоконный световод; ДЗ – дихроичное зеркало; О – зеркальный отражатель; *DEMUX* – демультиплексор; ФП – линейка фотоприемников; У – усилитель; ПУ – пороговое устройство; К – коммутатор; ЧМ – двухканальный частотомер

Figure 1 – Scheme of the quasidistributed recirculating fiber-optical temperature sensor: CPU – central processing unit; RB – regeneration block; CM – current modulator; IL – range injection lasers; MUX – multiplexer; DC – directional coupler; OF – optical fiber; DM – dichroic mirror; R – reflector; DEMUX – demultiplexer; PD – photodetectors; A – amplifier; C – comparator; S – switch; FM – frequency

Рециркулирующий импульс от требуемой волоконно-оптической секции по сигналу с блока управления, обработки и отображения данных выбирается коммутатором К и регистрируется частотомером ЧМ. Полученная после фиксированного времени счета усредненная частота рециркуляции с частотомера передается в блок управления, обработки и отображения данных, где по заданному алгоритму производится преобразование частоты рециркуляции в измеряемую температуру. Чувствительный элемент ВОДТ представляет собой отрезки кварцевых многомо-

довых волоконных световодов с металлическим покрытием. На каждом цикле рециркуляции осуществляется так называемая 2*R*-регенерация (re-amplification + re-shaping), т.е. происходит восстановление информационного импульса по форме, амплитуде и длительности, что позволяет поддерживать процесс рециркуляции неограниченно долго. Информационным параметром является временное положение циркулирующего импульса. Блок управления через блок регенерации может управлять числом рециркуляционных информационных каналов, запуская либо все из них, либо только те, которые соответствуют необходимым волоконным секциям. Различные длины волн и спектрально-селективные элементы используются для того, чтобы не только измерять температуру, но и локализовать пространственный отрезок, на котором эта температура действует. Измерения осуществляются на основе последовательного отслеживания изменения разности частот рециркуляции на соседних участках на соседних длинах волн:

$$\Delta f_i(\theta) = f(\lambda_{i-1}) - f(\lambda_i). \quad (1)$$

Отличительная особенность данной структуры заключается в том, что в ней используются стандартные, коммерчески доступные, относительно недорогие элементы.

В качестве двухканального частотомера предлагается использовать электронно-счетные частотомеры *Agilent Technologies* 53132A с высокими техническими характеристиками и производительностью, которые обеспечивают быстрые и точные измерения частоты. Измерения производятся при разрешении 12 разрядов при времени счета 1 с в диапазоне частот до 225 МГц. Для применения в системах, управляемых компьютером, частотомер имеет стандартный интерфейс *GPIB* и программное обеспечение *IntuiLink* с возможностью программирования на языке *SCPI* при скорости передачи данных до 200 полностью сформатированных результатов измерения в секунду. Стандартный интерфейс *RS*-232 используется только в режиме вывода данных и обеспечивает поддержку принтера или передачу данных в компьютер с помощью программы эмуляции терминала. Программный пакет *Agilent IntuiLink* обеспечивает легкий доступ к данным частотомера со стороны компьютера. Частотомер накапливает точные результаты измерения частотных и временных параметров сигналов. При этом пользователь работает в хорошо знакомой среде, используя прикладные компьютерные программы, такие как *Microsoft Excel* или *Word* для анализа, интерпретации, отображения, печати и документирования данных, полученных от частотомера.

Блок управления и обработки данных выполняет несколько функций. Во-первых, с использованием специально написанной программы разность частот, поступающих с двух выходов частотомера, преобразуется в измеряемую температуру, которая затем, наряду с выбранной секцией измерений, отображается на дисплее. Кроме того, на дисплее в реальном масштабе времени прорисовывается график изменения температуры в зависимости от времени. Во-вторых, с помощью управляющих сигналов, поступающих с БУО на коммутатор, происходит выбор участка оптоволоконного чувствительного элемента, с которого снимаются данные по измерению температуры. В-третьих, для каждого порогового устройства устанавливается свой индивидуальный порог срабатывания. Это связано с тем, что амплитуда импульсных сигналов, приходящих от каждой волоконно-оптической измерительной секции, будет различной, а для устойчивой работы системы необходимо, чтобы пороговый уровень соответствовал линейному участку фронта импульса, т.е. $U_{thi} = (0{,}3–0{,}8)U_{ai}$.

Использование в качестве спектрально-селективных элементов волоконных решеток Брэгга является затруднительным из-за того, что их спектр отражения смещается в зависимости от температуры и приложенного механического напряжения согласно выражению:

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n\Lambda\left(\left\{1-\left(\frac{n^2}{2}\right)\left[P_{12}-\nu(P_{11}+P_{12})\right]\right\}\varepsilon+\left[\alpha+\frac{1}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\theta}\right]\Delta\theta\right),$$

где Λ – период решетки; $\Delta\theta$ – изменение температуры; ε – приложенное механическое напряжение; P_{11}, P_{12} – коэффициенты Поккельса упругооптического тензора; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла; n – эффективный показатель преломления основной моды.

Кроме того, решетки Брэгга, сформированные в стандартном телекоммуникационном волокне, начинают разрушаться при температурах, более 200 °С. Поэтому в качестве спектрально-селективных отражающих элементов предла-

гается использовать дихроичные зеркала (ДЗ), способные отражать одну и пропускать другую часть спектра падающего излучения благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических пленках. Данные структуры имеют следующие преимущества [2]:

– поскольку излучение в дихроичных зеркалах практически не поглощается, они могут работать при больших плотностях световой энергии;

– возможность работать при достаточно высоких температурах окружающей среды (до 500 °С) без расплавления и деформации;

– благодаря своей конструкции они обладают значительным временем эксплуатации без ухудшения спектрально-селективных свойств;

– из-за того, что дихроичные зеркала имеют широкую спектральную полосу отражения, нет необходимости использовать специальные меры по стабилизации спектральных характеристик полупроводниковых лазеров.

Дихроичные зеркала и ВС могут соединяться двумя способами: 1) с помощью разъемных соединений (использование иммерсионных жидкостей и микролинз на торцах ВС дает потери мощности излучения 1,5–2 дБ на одно ДЗ); 2) с помощью неразъемных соединений с использованием специальных клеевых смол (в этом случае потери составляют 0,5 дБ на одно ДЗ). Анализ современного состояния технологий показал, что коммерчески доступные ДЗ при нормальном падении излучения в интересующей нас области красного и ближнего ИК-диапазона обладают шириной спектра отражения ± 20–40 нм, коэффициент отражения при этом составляет 93–99 %, коэффициент пропускания – 85–90 % [2]. Если взять ширину спектра отражения ДЗ 40 нм, то для спектрального диапазона работы полупроводниковых лазеров в интервале 700–740 нм можно использовать 1 ДЗ, в интервале 800–900 нм – 2 ДЗ, в области 1080 нм – 1 ДЗ, в области 1200 нм – 1 ДЗ, в области 1300 нм – 1 ДЗ, в интервале 1530–1610 нм – 2 ДЗ. Следовательно, общее количество ДЗ может доходить до 8, и соответственно существуют 8 пространственных отрезков контроля температуры.

Оценка метрологических характеристик измерительной системы

Для ВОД рециркуляционного типа существенным является время установления t_{est}, после которого частота рециркуляции изменяется незначительно. На рисунке 2 при длине ВС 500 м показана зависимость изменения средней частоты рециркуляции f_{avg} и относительной долговременной нестабильности χ от времени начиная с момента запуска рециркуляции. Оценку относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции ВОД проводили согласно следующему выражению:

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left| f_i - f_{avg} \right|}{m} / f_{avg},$$

где f_{avg} – средняя частота рециркуляции за время наблюдения t_n; f_i – результаты отдельных измерений; m – число измерений в течение времени наблюдения.

Из проведенных экспериментов следует, что через 15 мин после начала работы для L = 500 м в течение последующих 30 мин среднее значение частоты рециркуляции колебалось в пределах 397 095–397 096 Гц, в то время как максимальное значение относительной нестабильности частоты рециркуляции для каждого момента наблюдений принимало значение не более $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ при времени счета ЧМ 10 с (погрешность измерений частоты составляла $\delta = \pm 4{,}6 \cdot 10^{-7}$. В экспериментах также контролировался ток, протекающий через лавинный фотодиод (рисунок 2). Уменьшение тока через фотоприемник связано с падением мощности излучения ИЛ из-за возрастания порогового тока, обусловленного нагреванием лазерного кристалла.

Одним из традиционных способов повышения метрологических характеристик ВОД является увеличение времени измерений. Экспериментальные измерения частоты рециркуляции показали, что ее относительная долговременная нестабильность при времени счета $t_c = 10^{-3}$ с для L = 50 м составляла $9{,}4 \cdot 10^{-5}$. В теории вероятности показано [3], что погрешность измерения случайной величины линейно уменьшается при увеличении времени счета пропорционально $\sqrt{N}$, где $N = t_c/t_{c0}$. Это проиллюстрировано зависимостью 1 на рисунке 3 при $t_{c0} = 10^{-3}$ с. Кривая 2 на рисунке 3 представляет собой экспериментальную зависимость относительной долговременной нестабильности χ от времени счета t_c. Анализ графиков показал, что нарастающее отклонение величины χ от линейного закона при увеличении времени счета свидетельствует о том, что ВОД рециркуляционного типа обладают свойством накапли-

вать флуктуации в процессе циркуляции. Следовательно, нет смысла устанавливать время счета частотомера в подобных ВОД более чем 1 с.

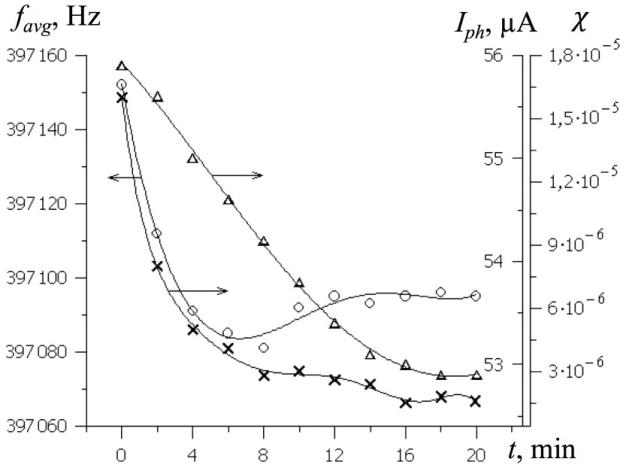


Рисунок 2 – Зависимость изменения среднего значения частоты рециркуляции (o), относительной долговременной нестабильности (x) и величины тока через лавинный фотодиод (Δ) в волоконно-оптических датчиках от времени, начиная с момента запуска циркуляции

Figure 2 – Time dependence of average frequency recirculation (o), relative long-term instability of recirculation frequency (x) and the current through avalanche photodiode (Δ) in fiber optical temperate sensor since the start time of circulation

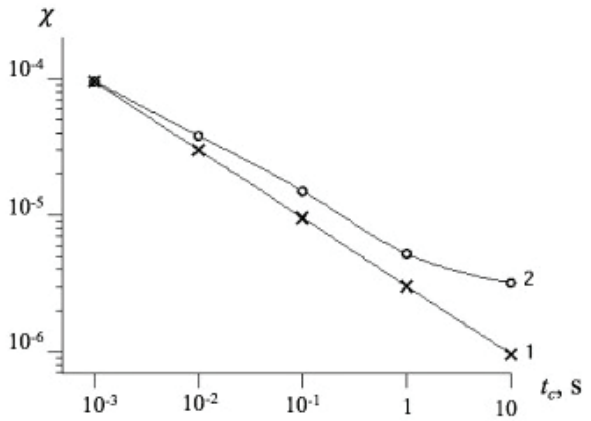


Рисунок 3 – Зависимость величины относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции от времени измерения: 1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные данные

Figure 3 – Time dependence of relative long-term instability of recirculation frequency: 1 – calculated value; 2 – experimental data

Для анализа функции отклика представленной схемы ВОДТ разработана математическая модель, учитывающая химический состав ВС, относительную долговременную нестабильность частоты рециркуляции, температурную зависимость коэффициента линейного расширения, показателя преломления и модуля Юнга волокна.

Для длины ВС $L > 100$ м задержкой в электронной части схемы можно пренебречь, и период рециркуляции практически определяется длиной световода. В этом случае частота рециркуляции будет принимать следующий вид:

$$f_i \approx \frac{c}{2(L_1(\theta_{atm})n(\theta_{atm}) + L_i(\theta)n_i(\theta))}, \quad (2)$$

где L_1 и n – длина ВС без металлического покрытия и показатель преломления, не задействованные в процессе измерения и находящиеся под воздействием температуры окружающей среды θ_{atm}; L_i и n_i – длина измерительной секции ВС с металлическим покрытием и показатель преломления, находящееся под воздействием измеряемой температуры; i – номер измерительной секции; c – скорость света в вакууме.

Температурная зависимость $n(\theta)$, $L(\theta)$ описывается следующим образом [4]:

$$n_i(\theta) = n_0\left[1 + a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2\right]; \quad (3)$$

$$L_i = L_0\left[1 + \alpha(\theta - \theta_0)\right], \quad (4)$$

где L_0 и n_0 – длина и показатель преломления ВС при температуре калибровке θ_0 a и b – температурные коэффициенты, характеризующие изменение показателя преломления при повышении температуры на 1°C, α – коэффициент линейного теплового расширения. Например, для чистого кварца значения для данных формул имеют следующий вид: n_0 = 1,444; $a = 6{,}2\cdot10^{-6}\text{C}^{-1}$ и $b = 5{,}1\cdot10^{-9}\text{C}^{-2}$

Показатель преломления ВС зависит не только от температурного воздействия, но и от длины волны излучения. Спектральная зависимость показателя преломления стекла наиболее часто описывается трехчленной формулой Селмейера [5]:

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{A_i\lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}}. \quad (5)$$

Данная формула содержит шесть коэффициентов (A_1, A_2, A_3, l_1, l_2, l_3), характеризующих стекло. Они определяются экспериментально. С помощью этой формулы можно вычислить показатели

преломления для любой длины волны в интервале от 365 до 2325 нм с точностью около $\pm 5 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент линейного температурного расширения стекла рассчитывался по методике, описанной в [6]:

$$\alpha \cdot 10^{-7} = \sum \gamma_i \alpha_i = \frac{\sum \gamma_i \% \alpha_i}{100} = \frac{\sum \gamma_{im} \alpha_i}{\sum \gamma_{im}}, \quad (6)$$

где γ_i – содержание оксида в материале, мол. доли; $\gamma_i\%$ – содержание оксида в материале, мол. %; γ_{im} – содержание оксидов в материале, моль; α_i – парциальные линейные коэффициенты расширения компонентов (оксидов и солей) в материалах.

Для большинства силикатных стекол модуль Юнга с достаточной точностью может быть рассчитан по аддитивной формуле: $E_0 = \sum a_i \cdot \gamma_i$, где γ_i – содержание окисла, мол %; α_i – постоянный для каждого оксида коэффициент. Температурная зависимость модуля Юнга для сердцевины волокна имеет вид:

$$E_{\text{core}} = E_0 + A(\theta - \theta_0) - B(\theta - \theta_0)^2, \quad (7)$$

где *A, B* – известные константы, определяемые экспериментально для каждого типа легирования [7].

В датчиках температуры, как правило, используются ВС с металлическим покрытием. Это повышает точность датчика и обеспечивает практически полную нечувствительность датчика к давлению. Поскольку линейный коэффициент теплового расширения для металлического покрытия больше, чем для кварцевого материала сердцевины и оболочки ВС, то температурное расширение покрытия вызывает дополнительную деформацию ВС. Коэффициент линейного расширения металла изменяется с изменением температурного интервала нагрева как [4], где a_0 и b_0 – коэффициенты для определенного металла:

$$\alpha_m = a_0 + b_0 (\theta - \theta_0).$$

В случае отсутствия проскальзывания между конструктивными элементами ВС результирующий коэффициент линейного теплового расширения рассчитывается в виде [8]:

$$\alpha = \frac{\sum_i S_i E_i \alpha_i}{\sum_i S_i E_i}, \quad i = 1,\ 2,\ 3, \quad (8)$$

где S_i – площадь сечения волокна; E_i – модуль Юнга; $i = 1$ – сердцевина волокна; $i = 2$ – оболочка; $i = 3$ – покрытие ВС.

Используя предложенную структуру ВОДТ и разработанную математическую модель, можно, например, рассчитать функцию преобразования и оценить погрешность измерения датчика. Расчеты производились для многомодового волокна диаметром 50/125 мкм, сердцевина которого состоит из кварца, легированного оксидом германия, оболочка – чистый кварц. Защитное покрытие толщиной 50 мкм выбирается из трех металлов: алюминий, никель и медь.

Подставляя формулу (2) в (1), получаем выражение для разности частот рециркуляции (частоты, которые регистрируются от соседних участков $i - 1$ и i на длинах волн λ_{i-1} и λ_i соответственно):

$$\Delta f = f_i - f_{i-1} = -\frac{L(\theta) n(\theta) \cdot c}{2\left(L_1(\theta_{atm}) n(\theta_{atm}) + (i-1) L(\theta) n(\theta)\right) \cdot \left(L_1(\theta_{atm}) n(\theta_{atm}) + i \cdot L(\theta) n(\theta)\right)}. \quad (9)$$

В свою очередь, данную разность частот, фиксируемую при температуре калибровки θ_0, можно рассчитать согласно выражению:

$$\Delta f_0 = -\frac{L(\theta_0) \cdot c}{2\left[L_1(\theta_0) + (i-1) L(\theta_0)\right] \cdot \left[L_1(\theta_0) + i \cdot L(\theta_0)\right] n(\theta_0)}. \quad (10)$$

Таким образом, регистрируемая функция отклика при измерении температуры будет иметь вид:

$$\delta f(\theta) = \Delta f - \Delta f_0. \quad (11)$$

Для измерения температурных полей в шахте глубиной 800 м выбираем 8 измерительных секций по 100 м. Пусть длина подводящего ВС составляет 50 м. Рассмотрим случай, когда результирующая длина волокна, которую проходит оптический импульс, распространяясь в прямом и обратном направлениях, составляет 500 м.

В этом случае будет контролироваться температура вдоль второй измерительной секции. На рисунке 4 представлены зависимости δf от температуры для $i = 2$ для ВС с различными типами металлического покрытия. Видно, что самый большой наклон у ВС, защитное покрытие которого состоит из алюминия. Для данной кривой 3 была проведена аппроксимация передаточной функции выражением вида $\delta f = -28 + 3{,}28 \cdot \theta$.

Из данной формулы следует, что чувствительность метода составляет 3,28 Гц/°С. Сравнивая полученные результаты с данными, представленными на рисунке 2, можно оценить погрешность измерений, не превышающую ±0,2 °С. Системы контроля температуры, разработанные *Sensa* (подразделение компании *Schlumberger*) и основанные на оптической рефлектометрии отраженного сигнала, позволяют получить сопоставимое разрешение по температуре при времени сбора данных по спектру в течение приблизительно одного часа [1].

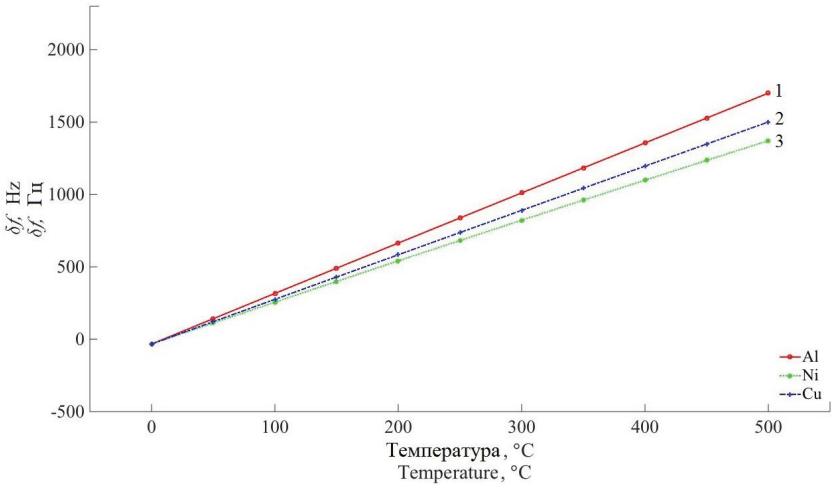


Рисунок 4 – Передаточная характеристика измерительной системы для волокна, сердцевина которого состоит из чистого кварца SiO_2, оболочка – кварц, легированный оксидом бора B_2O_3 и защитное покрытие состоит из алюминия Al (1), меди Cu (2), никеля Ni (3)

Figure 4 – Transfer function of measurement system for fiber, which comprises of core from pure quartz SiO_2, covering is quartz doped boron oxide B_2O_3 and protective coating comprises of Al (1), Cu (2), Ni (3)

Поскольку коэффициент температурного линейного расширения металлического покрытия значительно больше, чем этот коэффициент для кварцевого волокна, было проведено моделирование зависимости относительного удлинения ВС в широком температурном диапазоне (рисунок 5). По различным источникам [9–11] допускается относительное удлинение волокна на величину от 0,2 до 0,36 % при сроке службы кабеля в 25 лет и до 1 % при сроке в пределах 10 лет, без ухудшения его свойств в течение всего времени эксплуатации. Из графиков на рисунке 5 видно, что для того чтобы $\Delta L/L$ не превышало 1 %, измеряемая температура не должна превышать 500 °С.

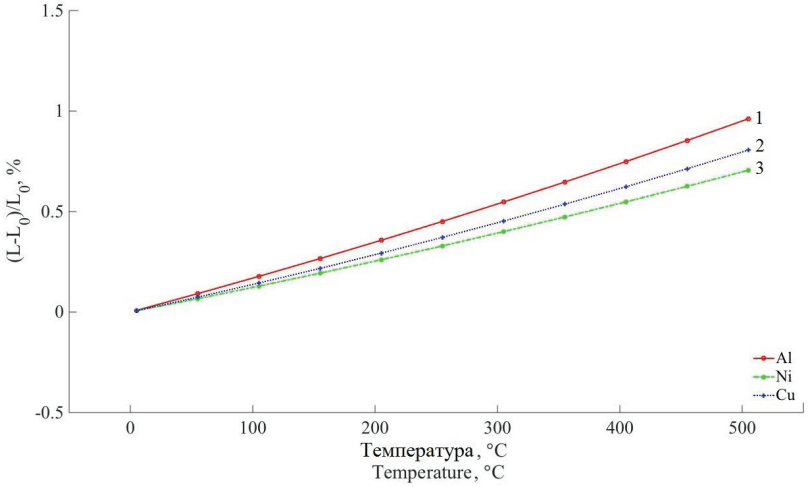


Рисунок 5 – Относительное удлинение волокна из кварца, оболочка легированная B_2O_3, а защитное покрытие состоит из алюминия Al (1), меди Cu (2) и никеля Ni (3)

Figure 5 – Relative extension of quartz fiber with cover doped with boron oxide B_2O_3 and protective coating comprises of Al (1), Cu (2), Ni (3)

Заключение

Разработана структура квазираспределенной волоконно-оптической системы мониторинга температурных полей при добыче высоковязкой нефти термическими способами. В данной схеме реализован новый принцип частотного представления информации с периодической регенерацией по форме, амплитуде и длительности циркулирующих на разных длинах волн оптических импульсов. Чувствительным элементом выступали отрезки многомодового волоконного световода с металлическим покрытием, спектрально-селективными элементами являлись дихроичные зеркала. Фиксировалась разность частот рециркуляции оптических импульсов на различных длинах волн на соседних участках ВС, и по ее изменению определялась измеряемая температура. По таким характеристикам, как погрешность измерений, время измерений, диапазон измеряемых температур, надежность, стоимость, такое устройство способно превзойти существующие аналоги.

Разработанная квазираспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры имеет следующие технические характеристики:

– чувствительный элемент – многомодовое волокно с диаметром 50/125 мкм; сердцевина – плавленый кварц, легированный оксидом германия; оболочка – чистый кварц; защитное покрытие – алюминий (толщина 50–200 мкм);

– диапазон измеряемых температур 0–500 °С;

– спектр рабочих длин волн источников излучения 700–1630 нм;

– 8 пространственных отрезков контроля температуры;

– погрешность не более ± 0,2 °С при изменении температуры от 0 °С до +500 °С;

– чувствительность метода 3,28 Гц/°С;

– время счета 1 с;

– время начала измерений после включения рециркуляции 15 мин.

Список использованных источников

1. *Браун, Д.* Распределенные системы контроля температуры на базе современных волоконно-оптических датчиков / Д. Браун, Д. Рогачев // Технологии ТЭК. – 2005. – no 1. – С. 5–11.

2. *Takada, H.* High-energy dichroic chirped mirror for an ultrashort pulse amplification system / H. Takada, M. Kakehata, K. Torizuka // Jpn. J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 42, № 7A. – P. L760–L762.

3. *Купер, Дж.* Вероятностные методы анализа сигналов и систем : пер. с англ. / Дж. Купер, К. Макгиллем. – М. : Мир, 1989. – 376 с.

4. *Поляков, А.В.* Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014 . – 208 с.

5. *Гауэр, Дж*. Оптические системы связи : пер. с англ. / Дж Гауэр. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.

6. *Скрипникова, Н.К.* Термофизические свойства стекловидных покрытий на строительных материалах: методические указания к лабораторным работам / Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин. – Томск : Томский архитектурно-строительный университет, 2012. – 23 с.

7. *Лунин, Б.С.* О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол / Б.С. Лунин, С.Н. Торбин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2000. – Т. 41. – С. 172–173.

8. Температуростойкие волоконно-оптические модули / А.А. Абрамов, М.М. Бубнов, Н.Н. Вечканов // Труды ИОФАН. 1987. – Т. 5. – С. 72–82.

9. *Гиберт, Д.П.* Выбор подвесного оптического кабеля исходя из условий эксплуатации / Д.П. Гиберт // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – № 2 – С. 49–53.

10. *Бондаренко, О.В.* Выбор конструкции самонесущего оптического кабеля по растягивающим нагрузкам / О.В. Бондаренко, Д.В. Иоргачев, Л.Л. Мурадьян // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 1. – С. 18–21.

11. Возможность увеличения срока службы волоконно-оптических линий связи / О.И. Косяков, М.А. Липская, А.К. Мекебаева, А.Б. Матаева // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 561–563.

References

1. Brown D., Rogachev D. [Distributed temperature control system based on modern fiber-optic sensors]. *Tekhnologii TEK*, 2005, no. 1, pp. 5–11 (in Russian).

2. Takada H., Kakehata M., Torizuka K. High-energy dichroic chirped mirror for an ultrashort pulse amplification system. *Jpn. J. Appl. Phys*., 2003, vol. 42, no. 7A, p. L760–L762. **doi**: 10.1143/JJAP.42.L760

3. Cooper J.R., McGillem C.D. Probabilistic methods of signal and system analysis. New York, CBS College Publishing, 1986, 376 p.

4. Polyakov A.V. *Retsirkulyatsionnye optovolokonnye izmeritel'nye sistemy* [Recirculating fiber-optic measuring system]. Minsk, BSU Publ., 2014, 208 p. (in Russian).

5. Gower J. Optical communication systems, London, Prentice-Hall Int. Inc., 1984, 504 p.

6. Skripnikova, N.K., Volokitin O.G. *Termofizicheskie svoistva steklovidnykh pokrytii na stroitel'nykh materialakh* [Thermophysical properties of glassy coatings on construction materials: methodical instructions for laboratory works]. Tomsk, Tomsk

University of architecture and construction, 2012, 23 p. (in Russian).

7. Lunin B.S., Torbin S.N. [Temperature dependence of the young's modulus of pure quartz glasses]. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 2. Chemistry*, 2000, vol. 41, no. 3, pp. 172–173 (in Russian).

8. Abramov A.A., Bubnov M.M., Vechkanov N.N. [Heat-resistant fiber modules]. *Trudy IOFAN,* 1987, vol. 5, pp. 72–82 (in Russian).

9. Gibert D.P. [The choice of the suspended optical cable based on the operating conditions]. *CABLE-news*, 2009, no. 2, pp. 49–53 (in Russian).

10. Bondarenko O.V., Iorgachev D.V., Myradyan L.L. [The choice of design, self-supporting optical cable in a tensile stress]. *Technologiya and konstruirovanie v elektronnoj apparature Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature*, 2001, no. 1, pp. 18–21 (in Russian).

11. Kosyakov O.I., Lipskaya M.A., Mekebaeva A.K., Mataeva A.B. [The possibility of increasing the service life of fiber-optic communication lines]. *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 7, pp. 561–563 (in Russian).
doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-561-564