

Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2020. № 01. С. 1–16

DOI: [10.36027/rdeng.0120.0000157](https://doi.org/10.36027/rdeng.0120.0000157)

Представлена в редакцию: 27.12.2019

© Мисбахов Р.Ш., Васёв А.Н.,
Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г.,
Липатников К.А., Василец А.А.

УДК 621.383

Адресный волоконно-оптический датчик для измерения относительной влажности в комплектных распределительных устройствах

Мисбахов Р.Ш.¹, Васёв А.Н.²,
Сахабутдинов А.Ж.³, Нуреев И.И.³,
Морозов О.Г.^{3,*}, Липатников К.А.³,
Василец А.А.^{3,4}

* microoil@mail.ru

¹Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

²Набережночелнинские электрические сети, филиал ОАО «Сетевая
Компания», Набережные Челны, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

⁴Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова,
Казань, Россия

В данной работе предложен к рассмотрению двухсенсорный датчик уровня относительной влажности параллельной структуры, отличающийся от существующих использованием адресных волоконных брэгговских решеток, выполненных в волокне SMF-28. Одна из решеток имеет замененную полиимидом кварцевую оболочку, синтезированную с помощью восстановителя покрытия волокна, и полный мультипликативный отклик к температуре и деформации, вызванной влажностью. Вторая – представляет собой решетку, записанную в стандартном волокне, и реагирует только на температуру. Возможно включение дополнительной третьей решетки с частично вытравленной оболочкой, которая может быть применена для рефрактометрических измерений количества конденсированной влаги на элементах комплектного распределительного устройства. Все решетки идентичны, имеют, как правило, одинаковую длину волны Брэгга, после манипуляции над их оболочками, но отличаются уникальным адресом, который формируется записью двух окон прозрачности в каждой из решеток с различным разностным частотным пространством. Окна прозрачности соответствуют фазовым π -сдвигам, симметрично расположенным на одинаковом расстоянии от центра каждой из решеток. Полученная структура позволяет регистрировать информацию измерительного преобразования на указанных адресных разностных частотах в радиодиапазоне, что существенно повышает быстродействие измерений относительной влажности и их точность еще на порядок. В дополнение к сказанному можно отметить возможность построения сети указанных датчиков в последовательно расположенных комплектных распределительных устройствах, при этом в каждом из шкафов будет использована другая радиочастотная адресная группа.

Ключевые слова: диагностический мониторинг, оборудование высокого напряжения, комплектное распределительное устройство, относительная влажность, адресная волоконная брэгговская структура, травление оболочки, восстановленное полиимидное покрытие, микроволновая фотоника

1. Введение

Влажность является одним из важных параметров окружающей среды, который определяется содержанием водяного пара в воздухе. Существует три варианта, которые отражают количественное значение влажности: абсолютная влажность (АВ), относительная влажность (ОВ) и удельная влажность (УВ) [1]. В промышленных измерениях ОВ является одним из важных и наиболее часто используемых параметров.

Несмотря на развитие технологий электротехники и электроэнергетики в последние годы, измерение и контроль ОВ становятся все более и более важными и требующими применения в широком спектре областей, таких как влажность воздуха, элегаза, изоляции элементов, что введено в практику процесса эксплуатации и обслуживания комплектных распределительных устройств (КРУ). Повышенная ОВ однозначно определяет возможность увеличения интенсивности частичных разрядов, образования дуги и т.д.

К настоящему времени разработаны различные типы датчиков ОВ. Их можно классифицировать по методам измерительного преобразования на емкостные, резистивные, гравиметрические и механические [2]. Большинству датчиков ОВ нужен слой из материала, чувствительного к влаге, например, полимерный или гидрогелевый. Понятно, что ни один датчик, не может решить все задачи измерения ОВ, однако существующие датчики обеспечивают широкий диапазон, линейный отклик, небольшой гистерезис измерительного преобразования, при условии быстрого обмена чувствительного слоя с водяным паром, в широком спектре приложений.

По сравнению с обычными механическими и электрическими/электронными датчиками влажности, волоконно-оптические датчики (ВОД) ОВ [3], в том числе на кварцевом и полимерном волокне, демонстрируют множество уникальных преимуществ, таких как малый размер и малый вес, невосприимчивость к электромагнитным помехам, коррозионная стойкость, потенциал для дистанционного управления и квази-распределенного зондирования. В семействе ВОД датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) играют важную роль в широком спектре областей промышленных измерений [4]. Датчики на основе ВБР дополнительно обладают потенциалом мультипликативного отклика на разные физические поля [2-3], мультиплексирования в одном волокне для формирования полностью волоконной квази-распределенной сенсорной сети, простоту встраивания в различные элементы КРУ.

Таким образом, ВОД ОВ могут быть реализованы с помощью технологии ВБР и нанесенного на нее гигроскопического покрытия взамен стандартной кремниевой оболочки.

Цель данной работы – дать краткий обзор структуры, оптических свойств и принципов определения ОВ с помощью ВОД на основе ВБР с полиимидным гигроскопическим покрытием; представить экспериментальные результаты, полученные с его помощью; обсудить перспективы применения указанного типа датчиков, в том числе в комплексном применении с датчиками частичного разряда, содержания конденсированной влаги и в квази-распределенных измерениях.

2. Выбор гигроскопичного материала

Гигроскопичные материалы обычно используются для разработки ВОД ОВ с использованием ВБР для формирования процесса натяжения/сжатия решетки при поглощении и испарении водяных паров из указанных материалов [5]. В последнее время было опубликовано большое количество научных работ, в том числе [6-10], посвященных применению такого типа датчиков, и, несмотря на их относительно низкий динамический диапазон и чувствительность, они по-прежнему вызывают большой интерес в связи с простой возможностью компенсации в них мультипликативного влияния температуры. Кроме того, травление оболочки ВБР и восстановление ее оболочки гигроскопичным материалом повышает чувствительность этой оптической структуры.

К наиболее широко применяемым гигроскопичным материалам относятся полиимид, диуреасил или полиметилметакрилат (ПММА). Чувствительность ВБР, разработанных в [6-7], покрытых полиимидом методом погружения, варьируется от 1,4 до 5,6 пм/% относительной влажности в зависимости от толщины покрытия. Однако тот же материал обеспечил большую чувствительность (13,6 пм/% относительной влажности) при нанесении покрытия методом имидизации *in-situ* [9]. По результатам обеих работ показано, что чувствительность возрастает с увеличением толщины покрытия, что, однако, снижает быстродействие датчика.

По сравнению с растворами на основе полимеров [10] предлагаемый диуретановый слой демонстрирует повышенную чувствительность до 22,2 пм/% ОВ [8].

Оксид графена и углеродные нанотрубки (УНТ) также были испытаны в качестве чувствительного слоя для датчиков ОВ на основе ВБР. УНТ, нанесенные на вытравленную ВБР, обеспечивают самую высокую чувствительность измерения ОВ, которая составляет 31 пм/%. Однако, стоимость таких датчиков относительно высока.

Что касается мультипликативной чувствительности к температуре, которая присуща ВБР, то она была, например, компенсирована путем записи решетки на оптическом волокне с высоким двулучепреломлением. При этом формируется двойной отклик ВБР по каждой оси с разностной частотой, зависящей только от температуры. Можно найти и более простое решение на классическом одномодовом волокне, записав еще одну нормальную ВБР с отличной длиной волны в этом же волокне вблизи ВОД ОВ для определения температуры.

Нами в [11-12] предложена параллельная структура для реализации термокомпенсации в волоконном рефрактометре и разработаны методики для компенсации температуры в совмещенных датчиках [13].

Несмотря на двукратный проигрыш в чувствительности по сравнению с лучшими образцами ВОД ОВ, ВБР с полиимидным покрытием продолжает широко использоваться. Этому способствует возможность использования обычного связевого волокна SMF-28, наличие отработанных технологий травления его оболочки и полиимидного восстановления покрытий.

Полиимид – это класс термостойких полимеров, которые демонстрируют множество необходимых для построения ВОД ОБ свойств – высокую механическую прочность на растяжение, термостойкость и адгезивность к различным основаниям, а также уникальные гигроскопичные свойства, заключающиеся в линейном отклике на количество поглощенной или отданной влаги в ненасыщенном состоянии.

3. Математическая модель ВОД ОБ с частично протравленной оболочкой и восстановленным полиимидным покрытием

В датчике влажности на основе ВБР с полиимидным покрытием при изменении уровня температуры и влажности окружающей среды длина волны Брэгга будет сдвигаться в силу появления осевых деформаций, вызванных тепловым продольным расширением волокна и полиимидного покрытия.

Продольная деформация, вызванная тепловым расширением полиимидного покрытия, может быть выражена как

$$\varepsilon_T = (\alpha_{ОВ} - \alpha_T) \Delta T, \quad (1)$$

где $\alpha_{ОВ}$ – коэффициент теплового расширения гигроскопичного материала (полиимидного покрытия), α_T – коэффициент теплового расширения волокна.

Когда полиимидное покрытие поглощает или отдает влагу, его объем изменяется пропорционально количеству влаги, поглощенной в диапазоне ненасыщенности. Это изменение объема вызывает осевую деформацию волокна, называемую деформацией, вызванной влажностью [14], которая определяется как

$$\varepsilon_{ОВ} = \int_{ОВ_1}^{ОВ_2} \beta(ОВ, T) \Delta ОВ, \quad (2)$$

где β – индуцированный влажностью коэффициент продольного расширения полиимидного покрытия; T – температура. Поглощение насыщения полиимидного покрытия определяет максимальный диапазон изменения деформации, вызванной влажностью. Если в заданном диапазоне измерения $ОВ$, только $\varepsilon_{ОВ}$ является линейной функцией относительной влажности в заданном температурном диапазоне, ее можно приблизительно выразить как

$$\varepsilon_{ОВ} = \beta_{ОВ} \Delta ОВ, \quad (3)$$

где $\beta_{ОВ}$ – средний коэффициент расширения по влажности, а $\Delta ОВ = ОВ_2 - ОВ_1$ – разность влажностей. $\beta_{ОВ}$ можно определить с помощью экспериментальных измерений.

В итоге общая деформация, вызываемая в датчике влажности, может быть определена в соответствии с принципом суперпозиции, выраженная как

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \varepsilon_{ОВ}, \quad (4)$$

Суммарный сдвиг длины волны Брэгга ВОД ОБ с полиимидным покрытием под воздействием относительной влажности и температуры может быть определен как

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (S_{ОВ} \Delta ОВ + S_T \Delta T), \quad (5)$$

где $S_{ОВ}$ – чувствительность датчика по влажности, определяемая параметрами (3), а S_T – чувствительность датчика по температуре, определяемая параметрами (1).

Кроме этого на значение обеих чувствительностей оказывают влияние фотоэластичная постоянная и термооптический коэффициент волокна. Следует еще раз отметить, что чувствительность $S_{ОВ}$ зависит от толщины восстановленного полиимидного покрытия, а чувствительность S_T – от степени травления оптического волокна [15].

4. Конструкция адресного ВОД ОВ

В работе [16] нами была представлена малосенсорная система на основе адресных волоконных брэгговских структур [17] (АВБС) для обеспечения мониторинга литий-ионных аккумуляторных батарей. Система может быть использована для индикации температуры, состояния твердого электролита и геометрических размеров аккумуляторов. Параллельная структура предложенного в этой статье ВОД на основе АВБС была использована нами для создания ВОД ОВ и состоит из трех АВБС: АВБС₁ – датчика деформации с полиимидным покрытием (условно показаны зоны крепления (шахматная заливка) и гибкий подвод волокна (косая заливка)), АВБС₂ с вытравленной оболочкой – датчика рефрактометра и АВБС₃ – датчика температуры (рис. 1).

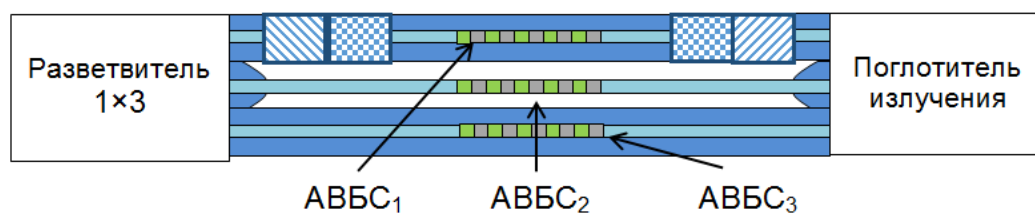


Рис.1. Структурная схема ВОД ОВ на основе трех АВБС

Для исследований по тематике статьи мы не стали менять конструкцию датчика, поскольку кроме измерения ОВ, измерение содержания конденсированной влаги также очень важны в высоковольтной энергетике, что осуществляется рефрактометрическим датчиком с вытравленной оболочкой.

Центральные длины волн решеток АВБС₁ и АВБС₂ при одинаковой температуре отличаются от центральной длины волны АВБС₃ в силу вытравливания в АВБС₂ оболочки волокна на определенную глубину и начальной деформации АВБС₁, покрытой полиимидным покрытием. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования источника зондирующего излучения с диапазоном, определяемым изменением температуры, как наибольшим. Необходимо лишь решение уравнений отдельно для температуры, коэффициента преломления и деформации.

В предлагаемом решении все решетки идентичны (имеют одинаковую длину волны Брэгга, после манипуляции над их оболочками), но отличаются уникальным адресом, который формируется записью двух окон прозрачности в каждой из решеток с различным

разностным частотным пространством. Окна прозрачности соответствуют фазовым π -сдвигам, симметрично расположенным на одинаковом расстоянии от центра каждой из решеток.

Полученная структура позволяет регистрировать информацию измерительного преобразования на адресных разностных частотах f_1 , f_2 и f_3 , которые соответствуют каждой из решеток и лежат в радиодиапазоне (единицы ГГц), что существенно повышает быстродействие измерений ОВ и их точность. Преимущества такой конструкции – отсутствие необходимости использования оптического дорогостоящего спектрального интеррогатора.

Для отработки технологии изготовления верхнего плеча ВОД ОВ первоначально использовалось оптическое волокно Corning SMF-28, что значительно удешевило отработку технологии. После определения окончательных требований к процессу травления, технология была отработана непосредственно при записанной в волокне ВБР.

Для травления волокна использовался 24% раствор фтористоводородной кислоты. Температурный режим помещения, в котором происходило травление – 20-23 С°. Приблизительное время травления 105±10 минут (в зависимости от температуры). Немаловажным является вопрос прочности вытравленного оптического волокна. Для сохранения целостности волокна процессе травления в раствор с плавиковой кислотой необходимо добавить поверхностно-активные вещества, которые способны снижать поверхностное натяжение на границе раздела фаз. С инженерной точки зрения ВРБ необходимо жестко зафиксировать на подставке для предотвращения изгибов волокна в процессе травления, как это показано на рис. 2.

После проведения процедуры «быстрого» травления, волокно промывается от кислоты, и его толщина проверяется под микроскопом. Если необходимая толщина достигнута, то процесс прекращается. Результат травления оптического волокна представлен на рис. 3.



Рис. 2. Процесс травления волокна с записанной ВБР

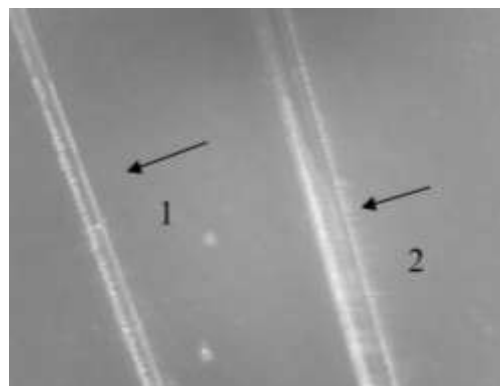


Рис. 3. Результат травления оптического волокна:
1 – вытравленное волокно, $d=60$ мкм,
2 – невозмущенное волокно, $d=125$ мкм

Если нет, то продолжается процесс «медленного» травления под наблюдением в микроскоп. Волокно прокапывается 5–7% раствором фтористоводородной кислоты. После окончания данного процесса волокно промывается и сушится.

После процесса травления, подготовленное волокно в лабораторных условиях подключается к интеррогатору и фиксируется установившаяся новая центральная длина волны ВБР. Это необходимо для дальнейшего контроля разности центральной длины волны между контрольной и измеряющей ВБР.

ВОД ОВ с восстановленным покрытием показан на рис. 4 (зона между темными отметками, более «мутная», чем не тронутое волокно).

Диаметр восстановленного полиимидным покрытием слоя составил 300 мкм. Использовалось автоматическое устройство для восстановления покрытия оптического волокна Vytran PTR-200 ARL (рис. 5), которое служит для повторного нанесения (восстановления) защитного буфера на зачищенный или протравленный участок оптоволокна.



Рис. 4. Участок волокна с восстановленным полиимидным покрытием – датчик деформации

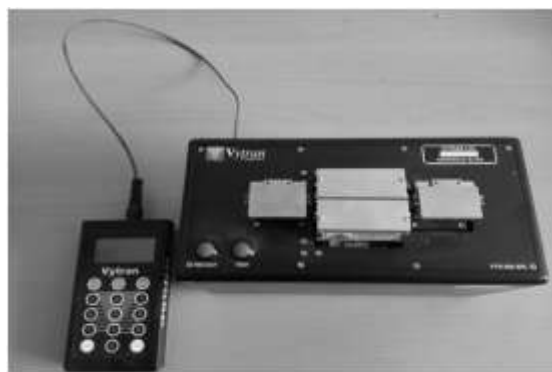


Рис. 5. Автоматическое устройство для восстановления покрытия волокна Vytran PTR-200

Для этого оптическое волокно размещается между двумя кварцевыми пластинами с канавкой, в которую подается полиимидное покрытие в жидкой фазе, отверждение осуществляется путем облучения этого материала УФ-излучением от встроенных светодиодов. Диаметр восстановленной оболочки задается размером канавки и может составлять как стандартные ~260 мкм, так и большую величину. После процедуры восстановления аппарат производит тест на разрыв.

Созданный ВОД ОВ работает в диапазоне измеряемых температур $-60...+180$ °С, погрешность измерений по температуре $\pm 0,1$ °С. Фото ВОД ОВ, закрепленного на токоведущей шине КРУ показан на рис. 6 в двух вариантах: в теплопроводящей капсуле и без нее. Для обеспечения воздухообмена в теплопроводящей капсуле сделаны отверстия.



Рис. 6. Разработанные прототипы ВОД ОВ на токопроводящей шине в теплопроводящей капсуле (слева) и без нее (справа)

Внутренняя структура ВОД ОВ показана на рис. 7.

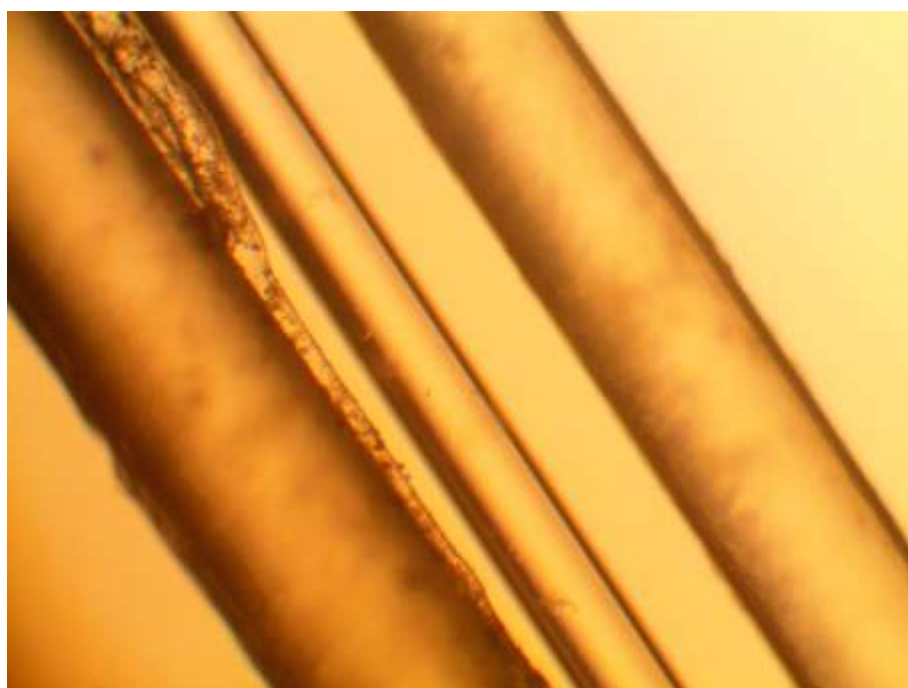
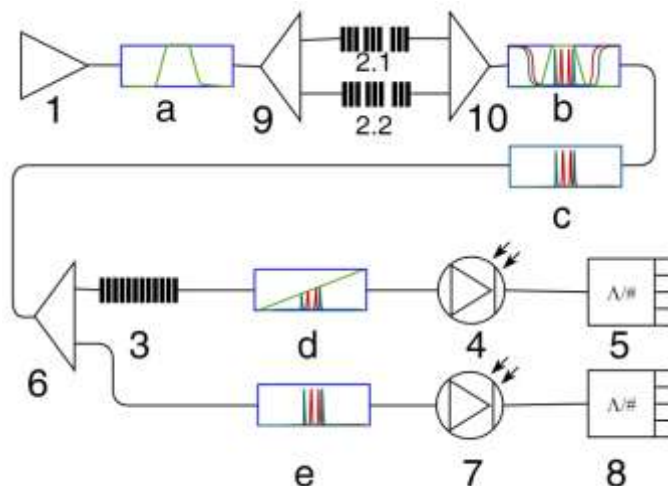


Рисунок 7. Внутренняя структура ВОД ОВ под микроскопом (слева направо: волокно с восстановленным полиимидным покрытием – датчик деформации, инициированной поглощением водяных паров; вытравленное волокно – рефрактометрический датчик конденсированной влаги; невозмущенное волокно – датчик температуры)

5. Модельный эксперимент

Модельный эксперимент для определения характеристик ВОД ОВ с полиимидным покрытием проводился на экспериментальной установке, которая схематично показана на рис. 8.



1 – широкополосный лазерный источник; 2.1–2.2 – АВБС₁ и АВБС₂; 3 – линейный наклонный фильтр; 4 – измерительный фотоприемник; 5 – измерительный АЦП; 6 – оптический разветвитель; 7 – опорный фотоприемник; 8 – опорный АЦП. Буквами а–е на рисунке схематично приведены спектральные диаграммы оптического сигнала на соответствующем участке схемы

Рисунок 8. Структурная схема системы с ВОД ОВ на АВБС

В этой работе в ВОД ОВ использовались решетки с длиной волны Брэгга $\lambda_B = 1556,65$ нм, измеренные после проведения всех технологических процедур при температуре 25 °С и ОВ 30%.

В качестве широкополосного источника света 1 использовался суперлюминесцентный излучающий диод с полосой излучения 3 нм (диаграмма *a*).

Излучение подавалось на АВБС через разветвитель 9. ВОД ОВ был размещен в климатической камере ACS Challenge с возможностью изменения и контроля температуры и ОВ. Каждая из двух АВБС 2.1 и 2.2 (с адресными частотами 14 и 21 ГГц) формирует двухчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение (диаграмма *b*) посредством оптоволоконного сумматора 10, на выходе с оптоволоконного сумматора получаем четырехчастотное лазерное излучение (диаграмма *c*). Четырехчастотное излучение проходит через оптоволоконный разветвитель 6 делит оптический сигнал на два канала – измерительный и опорный для контроля мощности. В измерительном канале установлен наклонный линейный фильтр 3, модифицирующий амплитуды четырехчастотного излучения в асимметричное извлечение (диаграмма *d*), после чего сигнал поступает на измерительный фотоприемник 4 и принимается на измерительный АЦП 5. Сигнал с АЦП 5 служит для определения положения АВБС. В опорном канале сигнал (диаграмма *e*) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала 7 и прини-

мается на опорный АЦП 8. Все дальнейшие вычисления идут с использованием отношения мощностей в измерительном и опорном каналах.

Выходные сигналы U_1 (с АВБС₁ с восстановленным полиимидным покрытием) и U_3 (с АВБС₃ с целой оболочкой) для огибающих на адресных частотах описываются следующими выражениями

$$U_1 = \delta_T(\lambda_B)T + \delta_{OB}(\lambda_B)OB; U_3 = \delta_T(\lambda_B)T, \quad (6)$$

где $\delta_T(\lambda_B)$, $\delta_{OB}(\lambda_B)$ – известные, экспериментально определенные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие деформациям ε_T , ε_{OB} решеток по температуре и ОВ, предварительно настроенных на средние длины волн λ_1 и λ_2 (для адресных АВБС $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B$).

Отсюда

$$T = \frac{U_1 - U_2 \delta_{OB}(\lambda_B)}{\delta_T(\lambda_B)(1 - \delta_{OB}(\lambda_B))}; OB = \frac{U_2 - U_1}{1 - \delta_{OB}(\lambda_B)}. \quad (7)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ВОД ОВ и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и скомпенсированной ОВ в зоне расположения датчика.

Измерительная характеристика ВОД ОВ показана на рис. 9.

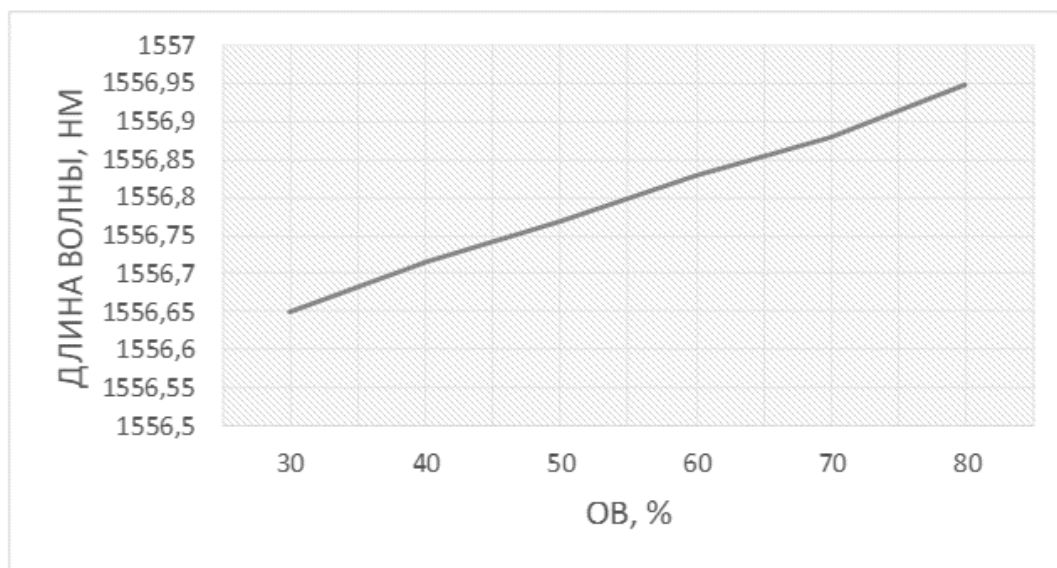


Рис. 9. Измерительная характеристика ВОД ОВ

Для ее построения температура климатической камеры была зафиксирована на уровне 25 °С, а уровень ОВ регулировали от 30% до 80% с шагом 10%. Исходя из этих результатов, ясно видно, что длина волны Брэгга ВОД ОВ с полиимидным покрытием линейно смещается в длинноволновую область по мере увеличения уровня относительной влажности. Чувствительность измерений по ОВ составила 6 пм/%. При этом разрешающая спо-

способность измерений определяется шириной линий излучения окон прозрачности АВБС и при их значении, равном 30 МГц, составляет 0,025 пм по длине волны Брэгга, что удовлетворяет требованиям к измерению ОВ в КРУ. Разрешающая способность классических оптических анализаторов спектра на 1-2 порядка ниже. При изменении температуры линейность зависимости сохраняется, но изменяется длина волны Брэгга решеток, что приводит к смещению характеристик вверх или вниз.

5. Заключение

Адресный ВОД ОВ на основе двух АВБС, одна из которых имеет полиимидное покрытие, разработан и смоделирован для онлайн мониторинга ОВ в КРУ. В работе представлен принцип действия и конструкция ВОД ОВ на основе ВБР с полиимидным покрытием. Также представлены некоторые первичные результаты экспериментов для определения измерительной характеристики датчика. Полиимидная смола является идеальным покрытием для изготовления ВОД ОВ на основе ВБР. При поглощении им влаги возникает деформация ВБР, определенная влажностью, что приводит к линейному и обратимому сдвигу длины волны Брэгга в зависимости от уровня ОВ в широком диапазоне измерений. Чувствительность ВОД ОВ зависит от толщины полиимидного покрытия. Более толстый полиимидный слой может эффективно вызывать большие напряжения, прикладываемые к ВБР, что приведет к увеличению значения сдвига длины волны Брэгга. Однако это, в свою очередь, неизбежно ухудшает время отклика датчика и увеличивает его восприимчивость к изменениям окружающей температуры.

Разработанный нами датчик невосприимчив к электромагнитным и электротехническим помехам, имеет высокий потенциал для внедрения в проектирование оперативной системы мониторинга ОВ в рамках концепции «Smart Grids Plus» [18]. Это экономически эффективный, без сложных оптико-электронных интеррогаторов и специальных каналов опроса, инструмент для оперативного мониторинга элементов КРУ по влажности, который может быть использован для контроля других энергетических генерирующих, распределительных и преобразовательных устройств, и просто встроен в слой диагностического мониторинга на основе пассивной волоконно-оптической сенсорной сети.

Учитывая адресные возможности АВБС на их основе могут быть построены мульти-сенсорные системы для распределенного акустического анализа внутри линейки КРУ с дополнительным комплексированием других датчиков для определения количества конденсированной влаги, уровня частичных разрядов, температуры токоведущих шин, контактов и других элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках государственного задания КНИТУ-КАИ №8.6872.2017/8.9 и гранта Президента Российской Федерации МК-3421.2019.8.

Список литературы

1. Hypszer R., Wierzba H.J. Fiber optic technique for relative humidity sensors // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 1997. Vol. 3054. Pp. 145-150. DOI: [10.1117/12.266701](https://doi.org/10.1117/12.266701)
2. Kolpakov S.A., Gordon N.T., Chengbo Mou, Kaiming Zhou. Toward a new generation of photonic humidity sensors // Sensors. 2014. Vol. 14. No. 3. Pp. 3986-4013. DOI: [10.3390/s140303986](https://doi.org/10.3390/s140303986)
3. Massaroni C., Caponero M.A., D'Amato R., Lo Presto D., Schena E. Fiber Bragg grating measuring system for simultaneous monitoring of temperature and humidity in mechanical ventilation // Sensors. 2017. Vol. 17. No. 4. P. 749. DOI: [10.3390/s17040749](https://doi.org/10.3390/s17040749)
4. Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – present status and applications // Sensors and Actuators A: Physical. 2008. Vol. 147. No. 1. Pp. 150-164. DOI: [10.1016/j.sna.2008.04.008](https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008)
5. Kronenberg P., Rastogi P.K., Giaccari P., Limberger H.G. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings // Optics Letters. 2002. Vol. 27. No. 16. Pp. 1385-1387. DOI: [10.1364/OL.27.001385](https://doi.org/10.1364/OL.27.001385)
6. Yeo T.L., Tong Sun, Grattan K.T.V., Parry D., Lade R., Powell B.D. Polymer-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing // IEEE Sensors J. 2005. Vol. 5. No. 5. Pp. 1082–1089. DOI: [10.1109/JSEN.2005.847935](https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.847935)
7. Huang X.F., Sheng D.R., Cen K.F., Zhou H. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating // Sensors and Actuators B: Chemical. 2007. Vol. 127. No. 2. Pp. 518-524. DOI: [10.1016/j.snb.2007.05.007](https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.05.007)
8. Correia S.F.H., Antunes P., Pecoraro E., Lima P.P. Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating // Sensors. 2012. Vol. 12. No. 7. Pp. 8847-8860. DOI: [10.3390/s120708847](https://doi.org/10.3390/s120708847)
9. Berruti G., Consales M., Giordano M., Sansone L., Petagna P., Buontempo S., Breglio G., Cusano A. Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2013. Vol. 177. Pp. 94-102. DOI: [10.1016/j.snb.2012.10.047](https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.10.047)
10. Yeo T.L., Sun T., Grattan K.T.V., Parry D., Lade R., Powell B.D. Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing // Sensors and Actuators B: Chemical. 2005. Vol. 110. No. 1. Pp. 148-156. DOI: [10.1016/j.snb.2005.01.033](https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.01.033)
11. Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С., Степущенко О.А., Кокурина О.Е., Арбузова Е.Ю. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // Тр. МАИ. 2012. № 61. С. 18.
12. Морозов О.Г., Степущенко О.А., Садыков И.Р. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток

- Брэгга с фазовым сдвигом // Вестник Марийского гос. техн. ун-та. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2010. № 3 (10). С. 3-13. Режим доступа: http://elibrary.ru/download/elibrary_15575847_99729134.pdf (дата обращения 9.03.2020).
13. Сахабутдинов А.Ж., Салахов Д.Ф., Нуреев И.И., Морозов О.Г. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 8. С. 32-38.
 14. Buchhold R., Nakladal A., Gerlach G., Sahre K., Eichhorn K.-J. Mechanical stress in micromachined components caused by humidity-induced in-plane expansion of thin polymer films // Thin Solid Films. 1998. Vol. 312. No. 1-2. Pp. 232-239. DOI: [10.1016/S0040-6090\(97\)00721-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00721-9)
 15. Ping Lu, Liqiu Men, Qiying Chen. Tuning the sensing responses of polymer-coated fiber Bragg gratings // J. of Applied Physics. 2008. Vol. 104. No. 11. Pp. 116110-1 - 116110-3. DOI: [10.1063/1.3042227](https://doi.org/10.1063/1.3042227)
 16. Казаров В.Ю., Морозов О.Г. Волоконно-оптические рефрактометры на основе брэгговских решеток с фазовым π -сдвигом // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. 2016. № 8. С. 34-41.
 17. Мисбахов Рус.Ш., Мисбахов Рин.Ш., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Сахабутдинов А.Ж., Артемьев В.И., Куревин В.В., Пуртов В.В. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3(46). С. 24. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4315> (дата обращения 9.03.2020).
 18. Маскевич К.В., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. Волоконно-оптическая парадигма диагностического мониторинга цифровой энергетики. Основа концепции "Smart Grids Plus" // Фотон-экспресс. 2018. № 4(148). С. 18-25.

Address Fiber Optical Sensor for Relative Humidity Measuring in a Switchgear

Rin.Sh. Misbakhov¹, A.N. Vasev²,
A.Zh. Sakhabutdinov³, I.I. Nureev³,
O.G. Morozov^{3,*}, K.A. Lipatnikov³,
A.A. Vasilets^{3,4}

*microoil@mail.ru

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of OJSC Network Company, Naberezhnye Chelny
Electric Networks, Naberezhnye Chelny, Russia

³Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev,
Kazan, Russia

⁴Kazan Innovative University n. a. V. G. Timiryasov, Kazan, Russia

Keywords: diagnostic monitoring, high voltage equipment, complete switchgear, relative humidity, address fiber Bragg grating, etching cladding, restored polyimide coating, microwave photonics

A number of governing documents and by-laws of the Russian Federation, branch ministries, departments and companies have introduced the use of measuring relative air humidity, elements insulation, and SF₆ into operation and maintenance process of complete switchgear. A wide range of high-precision laboratory instruments has been developed to implement these measurements. However, as a rule, these are scheduled measurements to be carried out once or twice a quarter, although the constant on-line monitoring of humidity is concerned in both the production and scientific circles of the energy industry. The possibility of on-line monitoring appeared with the advent of fiber-optic object-based passive networks for collecting information and the possibility of forming interrogation channels in them, which is provided for by the development of the Smart Grid Plus concept. Fiber optic sensors, single in their physical layer structure with passive optical networks, are highly robust and resistant to high electromagnetic fields, typical of those generated in a switchgear, and are designed to operate in harsh environments. Among their broad class, fiber optic sensors on Bragg gratings, which differ from others by direct measurement methods, have significant advantages. In particular, an increase or decrease in relative humidity will lead to a corresponding change in the wavelength of the sensing source reflected from the grating, which can be measured with an accuracy of sixth place from its absolute value.

This paper proposes to consider a two-element sensor of relative humidity of a parallel structure, which differs from the existing ones by using address fiber Bragg gratings made in SMF-28 fiber. One of the gratings has a polyimide-replaced quartz shell, synthesized using a

reductant fiber coating, and a completely multiplicative response to temperature and deformation caused by humidity. The second grating is recorded in a standard fiber and responds only to temperature. It is possible to include an additional third grating with a partially etched cladding, which can be used for refractometric measurements of the amount of condensed moisture on the elements of a complete switchgear. All the gratings are identical, have, as a rule, the same Bragg wavelength after manipulating their claddings, but they have differing unique addresses, which are formed by recording two transparency windows in each of the gratings with different difference frequency space. The transparency windows correspond to phase π -shifts symmetrically located at the same distance from the center of each grating. The structure obtained makes it possible to record information of the measurement conversion at the said difference frequencies in the radio range, which significantly increases the speed of relative humidity measurements and their accuracy by an order of magnitude more. In addition to what has been said, it is possible to note the capability for building a network of these sensors in series arranged in switchgear devices, with a different radiofrequency address group being used in each of them.

References

1. Hyszer R., Wierzba H.J. W. Fiber optic technique for relative humidity sensors. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1997, vol. 3054, pp. 145-150. DOI: [10.1117/12.266701](https://doi.org/10.1117/12.266701)
2. Kolpakov S.A., Gordon N.T., Chengbo Mou, Kaiming Zhou. Toward a new generation of photonic humidity sensors. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 3986-4013. DOI: [10.3390/s140303986](https://doi.org/10.3390/s140303986)
3. Massaroni C., Caponero M.A., D'Amato R., Lo Presto D., Schena E. Fiber Bragg grating measuring system for simultaneous monitoring of temperature and humidity in mechanical ventilation. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 4, p. 749. DOI: [10.3390/s17040749](https://doi.org/10.3390/s17040749)
4. Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, vol. 147, no. 1, pp. 150-164. DOI: [10.1016/j.sna.2008.04.008](https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008)
5. Kronenberg P., Rastogi P.K., Giaccari P., Limberger H.G. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 16, pp. 1385-1387. DOI: [10.1364/OL.27.001385](https://doi.org/10.1364/OL.27.001385)
6. Yeo T.L., Tong Sun, Grattan K.T.V., Parry D., Lade R., Powell B.D. Polymer-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing. *IEEE Sensors J.*, 2005, vol. 5, no. 5, pp. 1082–1089. DOI: [10.1109/JSEN.2005.847935](https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.847935)
7. Huang X.F., Sheng D.R., Cen K.F., Zhou H. Low-cost relative humidity sensor based on thermoplastic polyimide-coated fiber Bragg grating. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, vol. 127, no. 2, pp. 518-524. DOI: [10.1016/j.snb.2007.05.007](https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.05.007)
8. Correia S.F.H., Antunes P., Pecoraro E., Lima P.P. Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 8847-8860. DOI: [10.3390/s120708847](https://doi.org/10.3390/s120708847)

9. Berruti G., Consales M., Giordano M., Sansone L., Petagna P., Buontempo S., Breglio G., Cusano A. Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated fiber Bragg gratings sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 177, pp. 94-102. DOI: [10.1016/j.snb.2012.10.047](https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.10.047)
10. Yeo T.L., Sun T., Grattan K.T.V., Parry D., Lade R., Powell B.D. Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, vol. 110, no. 1, pp. 148-156. DOI: [10.1016/j.snb.2005.01.033](https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.01.033)
11. Sadykov I.R., Morozov O.G., Sadeev T.S., Stepushchenko O.A., Kokurina O.E., Arbuzova E.Yu. Fiber- optic refractometric sensor. *Trudy MAI* [Proc. of the Moscow Aviation Institute], 2012, no. 61, p. 18 (in Russ.).
12. Morozov O.G., Stepushchenko O.A., Sadykov I.R. Modulation methods of measurements in optical biosensors of refractometric type on basis of fiber Bragg fiber gratings with phase-shift. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Herald of the Marij El State Technical Univ. Ser.: Radiotechnical and Infocommunicative Systems], 2010, no. 3 (10), pp. 3-13. Available at: http://elibrary.ru/download/elibrary_15575847_99729134.pdf, accessed 9.03.2020 (in Russ.).
13. Sakhabutdinov A.Zh., Salakhov D.F., Nureev I.I., Morozov O.G. The procedure of solving problems for calibration of combined pressure and temperature sensors. *Nelinejnyj mir* [Nonlinear World], 2015, vol. 13, no. 8, pp. 32-38 (in Russ.).
14. Buchhold R., Nakladal A., Gerlach G., Sahre K., Eichhorn K.-J. Mechanical stress in micromachined components caused by humidity-induced in-plane expansion of thin polymer films. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 312, no. 1-2, pp. 232-239. DOI: [10.1016/S0040-6090\(97\)00721-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00721-9)
15. Ping Lu, Liqiu Men, Qiying Chen. Tuning the sensing responses of polymer-coated fiber Bragg gratings. *J. of Applied Physics*, 2008, vol. 104, no. 11, pp. 116110-1 – 116110-3. DOI: [10.1063/1.3042227](https://doi.org/10.1063/1.3042227)
16. Kazarov V.Yu., Morozov O.G. Fiber-optic refractometers based on Bragg gratings with phase π -shift. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Ser.: Natural and Technical Sciences], 2016, no. 8, pp. 34-41 (in Russ.).
17. Misbakhov Rus.Sh., Misbakhov Rin Sh., Morozov O.G., Nureev I.I., Kuznetsov A.A., Sakhabutdinov A.Zh., Artem'ev V.I., Kurevin V.V., Purtov V.V. Fiber Bragg gratings with two phase shifts as a sensing element and a multiplexing tool for sensor networks. *Inzhenerhyj vestnik Dona* [Engineering J. of Don], 2017, no. 3(46), p. 24. Available at: [http:// ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2017/4315](http://ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2017/4315), accessed 9.03.2020 (in Russ.).
18. Maskevich K.V., Misbakhov R.Sh., Morozov O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Zh. The fiber-optical paradigm of digital energy diagnostic monitoring. The basis of the "Smart Grids Plus" concept. *Foton-ekspress* [Photon-express], 2018, no. 4(148), pp. 18-25 (in Russ.).