

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ INSTRUMENT ENGINEERING

Научная статья  
УДК 621.383  
<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.38>

### Поляризационный волоконно-оптический датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора с радиофотонным адресным опросом

О. Г. Морозов<sup>✉</sup>, Рус. Ш. Мисбах, Рин. Ш. Мисбах,  
В. А. Иваненко, Е. В. Куликов, А. А. Потанин, Н. Е. Кувшинов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10  
OGMorozov@kai.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Силовые трансформаторы играют жизненно важную роль в системах передачи электроэнергии от источника до потребителя. Учитывая, что силовой трансформатор является наиболее важным и дорогостоящим оборудованием, используемым в электроэнергетике, диагностика его дефектов и контроль параметров на месте дают множество преимуществ для обеспечения её надёжной передачи. Невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность, высокая изоляция, а также малые габариты волоконно-оптических датчиков делают их очень привлекательными для применения в мониторинге силовых трансформаторов. Наиболее широкий спектр приложений в силовых трансформаторах нашли волоконно-оптические датчики температуры, влажности и деформации обмоток. В статье представлен волоконно-оптический датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора нового типа с радиофотонным адресным опросом, построенный на двух адресных волоконных брэгговских структурах волнового и фазового типов. Статическая чувствительность, полученная для датчиков на основе одномодового телекоммуникационного волокна SMF-28, составила 0,1 ГГц/Н в диапазоне от 1 до 100 Н. Эта чувствительность может быть увеличена практически на порядок при использовании специального волокна, поддерживающего поляризацию.

**Ключевые слова:** радиофотоника; энергетика; силовые трансформаторы; обмотка; контроль сжатия; волоконно-оптический датчик; адресные волоконные брэгговские структуры волнового и фазового типов; обработка в радиодиапазоне полученной в оптическом диапазоне частотной информации

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения программы «Приоритет – 2030».

**Введение.** Предложенная нами в [1] концепция Smart Grid Plus завоевывает новые горизонты применения. В дополне-

ние к решённым задачам мониторинга частичных разрядов [2], влажности [3], температуры шин и контактов комплектных

---

© Морозов О. Г., Мисбах Рус. Ш., Мисбах Рин. Ш., Иваненко В. А., Куликов Е. В., Потанин А. А., Кувшинов Н. Е., 2022.

**Для цитирования:** Поляризационный волоконно-оптический датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора с радиофотонным адресным опросом / О. Г. Морозов, Рус. Ш. Мисбах, Рин. Ш. Мисбах и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 4 (56). С. 38-50. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.38>

распределительных устройств [4] и др. внимание было сосредоточено на самом дорогостоящем элементе линий энергопередачи – силовом трансформаторе (СТ), в частности на задаче контроля деформаций и силы сжатия его обмоток с помощью волоконно-оптических датчиков (ВОД). Основным рынком России в области контроля обмоток СТ в основном ориентирован только на системы контроля их температуры.

Однако грозовые и дуговые разряды, короткие замыкания генерируют большой ток, вызывая механические деформации обмоток трансформаторов даже в большей степени, чем температура [5]. Существуют три типа оптических методов обнаружения деформации обмотки трансформатора [6]: датчики вибрации или давления на основе внутриволоконных интерферометров Фабри-Перо (ВИФП) и волоконных брэгговских решёток (ВБР), распределённые ВОД на основе эффекта Бриллюэна или Рамана.

Точечный ВОД для прямого измерения вибрации обмоток предложен в [7, 8]. Принцип действия датчика – ВИФП. Датчик используется для измерения магнитных силовых взаимодействий и вибраций внутри трансформатора, его полоса пропускания составляет от 20 до 1000 Гц.

Многоточечный ВОД давления на ВБР для измерения осевой силы обмоток трансформатора описан в [9]. Датчик спроектирован со структурой изгибающейся пластинчатой балки. Калибровочный эксперимент показал, что чувствительность датчика равна 0,133 пм/кПа, а погрешность воспроизводимости – 2,7 % от полной шкалы. Датчик контроля силы сжатия обмоток трансформатора (до 10 МПа) на основе оптического волокна со специальным композитным покрытием, которое позволяет преобразовать поперечные силы в продольные растягивающие, представлен в [10]. ВБР хорошо известны и используются для измерения не только продольных, но и поперечных нагрузок. Поперечная нагрузка вызывает

дифференциальную деформацию оптического волокна. Это приводит к тому, что оптическая сердцевина демонстрирует два разных эффективных показателя преломления и две «эффективные» ВБР, разнесённые по поляризации относительно наведённой разности показателей преломления. Эти принципы использовались для измерения поперечной деформации/нагрузки в различных приложениях [11]. При этом в [12] применялась ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, что позволило повысить чувствительность измерений и их разрешающую способность.

Первым субъективным недостатком метода с преобразованием поперечной силы сжатия в продольную деформацию [10] является зависимость свойств композитного материала от старения в ходе эксплуатации и при изменении её условий. Для поляризационного метода [11, 12] субъективный недостаток заключается в том, что степень двойного лучепреломления, вызванного малыми и умеренными поперечными нагрузками, очень мала. Требуются значительные усилия, чтобы точно считывать эти различия, что, в свою очередь, увеличивает стоимость обработки информации. Вторым объективным недостатком обоих методов является необходимость применения сложной и дорогостоящей оптоэлектронной аппаратуры (интеррогатора) для опроса ВБР. Кроме того, возможности мультиплексирования ВБР и использования многосенсорных сетей всё ещё ограничены. Только от 10 до 20 датчиков могут быть подключены к одному волокну, поскольку должны быть гарантированы свободные спектральные диапазоны, чтобы не было перекрытий между брэгговскими длинами волн ВБР. Отдельно ставится вопрос о компенсации температуры окружающей среды при контроле давления.

Поэтому дальнейший поиск привёл к необходимости использования распределённых ВОД на основе эффекта Бриллюэна или Рамана. В [13] представлен метод определения деформации обмотки транс-

форматора, основанный на методе рассеяния Бриллюэна. Результаты испытаний показали, что распределенное оптическое волокно может эффективно передавать натяжение провода, точность системы составляла 50 мкстрейн. В [14] было показано, что метод может эффективно идентифицировать общую форму деформации обмотки. Распределенные ВОД [8, 13, 14] имеют преимущество высокого пространственного разрешения, более широкого диапазона мониторинга. Таким образом, распределенная волоконно-оптическая система датчиков подходит для новых силовых трансформаторов. Датчики давления или вибрации [7, 9] можно использовать для старых трансформаторов, так как они устанавливаются на их внешних поверхностях или внутренних узлах, к которым есть доступ в СТ. Кроме того, более простая структура и меньший спрос снижают стоимость системы для коммерческих приложений.

Нами было найдено третье решение, основанное на применении вместо ВБР адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [15-17]. Основными их преимуществами являются возможность работы до 64 датчиков на одной длине волны, наличие в их структуре сверхузкополосных окон прозрачности, чувствительных к поперечным нагрузкам, возможность радиофотонного опроса каждой АВБС на частоте своего адреса и обработка информации в радиочастотной области, что существенно повышает метрологические характеристики разрабатываемого ВОД.

Таким образом, **целью работы** является создание научно обоснованных принципов построения поляризационного ВОД контроля силы сжатия обмоток трансформатора нового типа с радиофотонным опросом, построенным на двух АВБС, с возможностью повышения разрешающей способности и чувствительности измерений, а также компенсации температуры за счёт использования АВБС волнового и фазового типов.

Для достижения цели в первом разделе статьи рассмотрены научно обоснован-

ные принципы построения ВОД с анализом возможности улучшения его метрологических характеристик по сравнению с существующими. Во втором разделе раскрыты типовая конструкция ВОД и принципы компенсации в нём влияния температуры. В третьем разделе изложены вопросы развития концепции Smart Grid Plus как обсуждение задач мониторинга СТ с использованием АВБС. В заключении представлены полученные результаты для ВОД и определены направления дальнейших исследований по мониторингу СТ.

**1. Принцип действия ВОД.** Волоконные брэгговские решётки привлекли значительное внимание и использовались для измерения различных физических параметров [18, 19]. Наиболее известно использование ВБР для измерения структурной деформации в направлении, параллельном оптическому волокну. Однако также возможно использовать ВБР для измерения нагрузки в направлении, поперечном оптическому волокну [20, 21].

Многочисленные исследования показали, что реакция ВБР на поперечную нагрузку сильно отличается от осевой деформации. Осевая деформация вызывает линейный сдвиг центральной длины волны ВБР, в то время как внешняя поперечная нагрузка вызывает дополнительное двойное лучепреломление в оптическом волокне, создавая две различные брэгговские длины волн, соответствующие каждой из мод поляризации [11, 22, 23]. Эту функцию можно использовать для измерения поперечной нагрузки, поскольку разница длин волн между двумя пиками имеет линейную зависимость от приложенной нагрузки.

На самом деле большинство схем на основе ВБР для измерения поперечной нагрузки, которые были продемонстрированы до сих пор, обычно основано на принципе определения расстояния между длинами волн двух пиков. Однако ВБР имеет относительно низкую чувствительность к приложенной поперечной нагрузке.

ке по сравнению с чувствительностью к осевой нагрузке в основном из-за высокого значения модуля Юнга волокна. Кроме того, ширина спектральной линии однородной ВБР намного шире, чем сдвиг длины волны каждой моды поляризации, вызванный двулучепреломлением, что сильно ограничивает чувствительность и разрешение датчика.

По этой причине широко используется ВБР с фазовым сдвигом ( $\pi$ -ВБР), имеющая узкое окно прозрачности в спектре отражения, которое применяется в качестве сенсорного зонда [22]. Когда к  $\pi$ -ВБР прикладывается нагрузка, она становится двулучепреломляющей. В результате окно прозрачности  $\pi$ -ВБР будет разделено на две части, при этом расстояние между ними имеет прямое отношение к поперечной нагрузке. Поскольку спектр  $\pi$ -ВБР более узкополосный, чем спектр обычных решёток, он может обеспечить более точное измерение поперечной нагрузки с высоким разрешением. Разрешение традиционных схем опроса длин волн, таких как оптоэлектронный интеррогатор, слишком низкое, чтобы различать узкие окна прозрачности. Чтобы решить эту проблему, необходимо применить радиофотонный подход [23-25], который основан на регистрации радиочастоты, формируемой при фотосмещении.

В данной работе мы впервые предлагаем использование АВБС фазового типа ( $2\pi$ -АВБС) [15] в качестве датчика

поперечной силы сжатия. На рис. 1 представлена модель  $2\pi$ -АВБС (частотная характеристика по коэффициенту пропускания) без приложения поперечной нагрузки, а на рис. 2 – модель  $2\pi$ -АВБС под воздействием поперечной нагрузки. При этом сохраняется как адресность датчика, так и появляется возможность измерения величины поперечной силы сжатия с помощью радиофотонного интеррогатора [16].

Когда часть волокна находится под действием возмущения силы сжатия, из-за фотоупругого эффекта его эффективный показатель преломления (ПП) будет изменяться [26, 27]. Изменение эффективного ПП для поляризации по оси  $x$  и оси  $y$  может быть выражено следующим образом:

$$(\Delta n_{eff})_x = -\frac{n_{eff}^3}{2\nu} \times \left\{ \begin{aligned} &(p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_x + \\ &+ [(1 - \nu p_{12}) - \nu p_{11}][\sigma_y + \sigma_z] \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$(\Delta n_{eff})_y = -\frac{n_{eff}^3}{2\nu} \times \left\{ \begin{aligned} &(p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_y + \\ &+ [(1 - \nu p_{12}) - \nu p_{11}][\sigma_x + \sigma_z] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – модуль Юнга оптического волокна;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $p_{11}$  и  $p_{12}$  – компоненты тензора фотоупругости,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – компоненты напряжений для направлений  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.

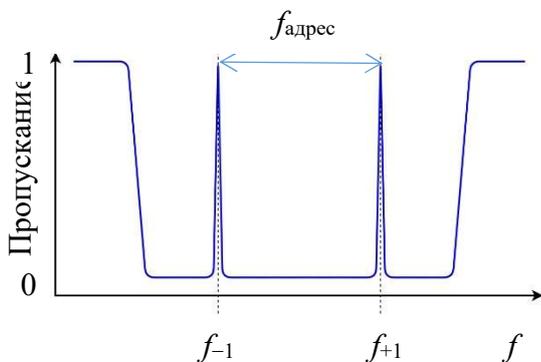


Рис. 1. Модель АВБС без поперечной нагрузки

Fig. 1. Model of Addressable Fiber Bragg Structures (AFBS) without Transverse Loading

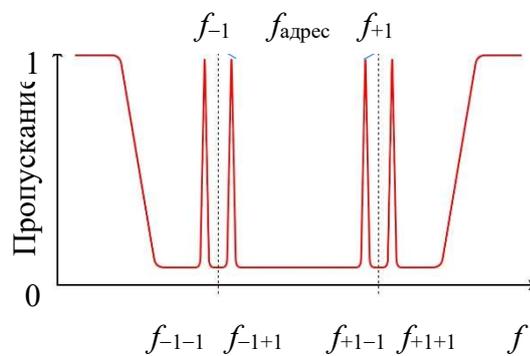


Рис. 2. Модель  $2\pi$ -АВБС под воздействием поперечной нагрузки

Fig. 2. Model of  $2\pi$ -AFBS under the Influence of Transverse Load

Для типичного германосиликатного волокна при приложении поперечной нагрузки к волокну изменения эффективного ПП по оси  $x$  и оси  $y$  имеют разные значения.

В 2 $\pi$ -АВБС в полосе отражения существуют два сверхузких пика пропускания, которые определяют ее адрес, выраженный в ГГц (см. рис. 1). Когда к 2 $\pi$ -ВБР приложена поперечная нагрузка, из-за разности изменения ПП сердцевинки волокна пики пропускания разделятся на два (см. рис. 2). Расстояние между длинами волн разделенных пиков ( $f_{-1-1}$  и  $f_{+1-1}$  –  $x$ -поляризации;  $f_{-1+1}$  и  $f_{+1+1}$  – ортогональной  $y$ -поляризации) будет изменяться при изменении поперечной силы. Измеренная зависимость между значением поперечной силы и частотой генерируемого биениями микроволнового сигнала изображена на рис. 3, который показывает очень хорошую её линейность.

Исходя из этой измерительной характеристики, мы можем ожидать, что, отслеживая частоту радиосигнала, можно измерить силу сжатия. При этом сохраняется и адресность датчика. На вход фото-

приёмника поступают четыре составляющие с одинаковыми амплитудами (рис. 2):

$$I_t = I_{-1-1} \cos 2\pi f_{-1-1} t + I_{-1+1} \cos 2\pi f_{-1+1} t + I_{+1-1} \cos 2\pi f_{+1-1} t + I_{+1+1} \cos 2\pi f_{+1+1} t. \quad (3)$$

После формирования биений в фотоприёмнике и определения на электронном анализаторе спектра их частот мы получим в вычислителе адресную частоту как разность между максимальной частотой биений и половиной минимальной:

$$f_{adr} = (f_{+1+1} - f_{-1-1}) - (f_{+1+1} - f_{+1-1}) / 2, \quad (4)$$

а частоту, соответствующую силе сжатия, – как минимальную частоту биений:

$$f_{load} = (f_{+1+1} - f_{+1-1}) = (f_{-1+1} - f_{-1-1}). \quad (5)$$

Таким образом, разработанный датчик позволяет получать информацию о силе сжатия на основе частотного анализа в радиодиапазоне по измерительной характеристике, представленной на рис. 3. Главное условие заключается в том, чтобы минимальная частота биений при максимальной силе сжатия была меньше половины адресной частоты.

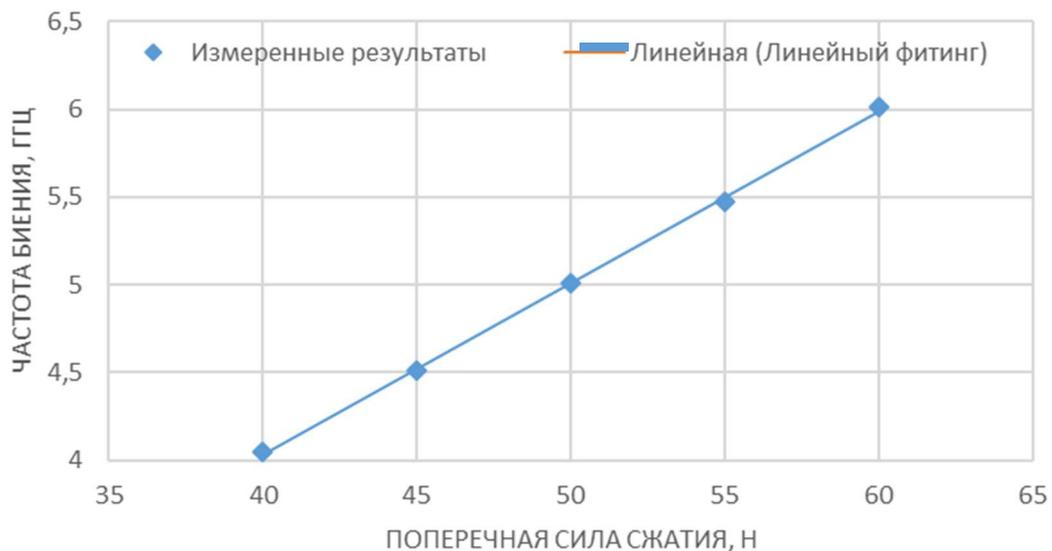


Рис. 3. Расстояние между длинами волн разделённых пиков (ГГц) при изменении силы сжатия (Н)  
 Fig. 3. Variation of Distance between Wavelengths of Separated Peaks (GHz) with Changes in Compression Force (N)

**2. Типовая конструкция ВОД с компенсацией температуры.** 2 $\lambda$ -АВБС была записана в телекоммуникационном фоточувствительном волокне (выдержан в водороде) в лаборатории записи волоконных решёток НИИ ПРЭФЖС с использованием метода [28] и ультрафиолетового лазера производства НГУ (Новосибирск). Чтобы приложить поперечную деформацию к 2 $\lambda$ -ВБР, мы использовали конфигурацию нагрузки, известную из работы [12], показанную на рис. 4. Измеренная центральная длина волны свободной решетки составила 1549,66 нм, при этом два пика пропускания фазовых сдвигов разделены на адресную частоту 21 ГГц, а каждый из них разделён по поляризации при нагрузке в 5 Н (давление верхней пластины, рис. 5) на 0,5 ГГц. Разделение пиков было измерено с использованием радиофотонного интеррогатора (РФИ), который имеет разрешение по частоте, определяемое шириной линии излучения лазера (100 кГц) [16].

2 $\lambda$ -АВБС и волокно того же диаметра, используемое для балансировки сил, были нагружены двумя металлическими пластинами (см. рис. 5), которые при использовании в реальной конструкции СТ должны быть заменены на диэлектрические, например стеклянные. Каждое волокно воспринимало половину общей силы, распределённой по стеклянным пластинам шириной 25,4 мм. Как показано на рис. 3, чувствительность по разному частот со-

ставляет 0,1 ГГц/Н. Большой разнос частот можно получить, если использовать специальное поляризационно-поддерживающее волокно [12], чувствительность которого в пределе составляет 0,96 ГГц/Н.

Второе волокно, применяемое для балансировки сил, можно использовать для определения температуры в зоне измерения силы сжатия с использованием АВБС волнового типа 2 $\lambda$ -АВБС, для которой поляризационное разделение несущественно из-за существенно большей полосы отражения, чем у АВБС фазового типа. Для этого сначала необходимо определить разностную частоту при нулевой силе сжатия в диапазоне температур 20-300 °С. Затем следует измерить наклон этих характеристик при каждой температуре, прикладывая усилие (в диапазоне 1-100 Н) к ВОД силы сжатия.

Учитывая, что температура по всей решётке одинакова, а используемые материалы термомеханически изотропны (по крайней мере, по сравнению с поляризационно-поддерживающим волокном), изменение температуры не должно вызывать изменений двойного лучепреломления. Наши экспериментальные результаты подтверждают это.

Установка датчиков на стеклянную пластину осуществляется клеевым способом, для чего используется клей 3М марки DP490. Диапазон измеряемых сил до 100 Н, абсолютная погрешность измерений  $\pm 0,1$  Н.

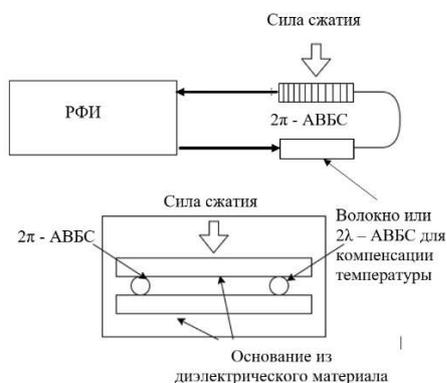


Рис. 4. ВОД силы сжатия и интеррогатор  
Fig. 4. Fiber-Optic Compression Force Sensor (FOS) and Interrogator

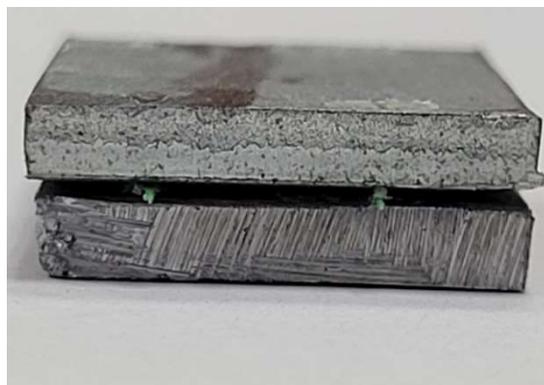


Рис. 5. Конструкция чувствительного элемента ВОД с разомкнутыми волокнами  
Fig. 5. Design of Sensitive FOS Element with Exposed Fibers

**3. Развитие концепции Smart Grid Plus на основе применения АВБС для метрологического обеспечения СТ.** Волоконно-оптические технологии предоставляют многочисленные возможности для систем интеллектуальной энергетики, в том числе мониторинга СТ. В то же время применение АВБС является новой концепцией для исследователей и инженеров-электриков. Несмотря на то что были предприняты значительные усилия в области измерения с помощью АВБС температуры, влажности, частичных разрядов, по-прежнему остаются нераскрытыми области их применения. Кроме того, основные работы, выполняемые в лабораториях по малым и упрощенным моделям, далеки от реальных полевых условий.

Таким образом, исследования стабильности волоконно-оптической сенсорной системы на АВБС в реальном СТ должны быть сосредоточены на полевых исследованиях. Методы применения АВБС в СТ следует оценивать с учётом высокого уровня электрических помех, способных вызвать нелинейные эффекты в волокне, а также существенных изменений температур внутри трансформатора, которые могут превышать 300 °С. Кроме того, ВОД обычно требуют длительной работы в трансформаторной среде. Старение материала ВОД является ещё одной важной проблемой, которую следует учитывать.

Несмотря на это, в качестве одной из задач можно рассматривать обнаружение газов в силовых трансформаторах. В [29] нами представлен новый комбинированный датчик газа на базе АВБС и ВИФП. Для мониторинга деформации обмотки следует рассмотреть преимущества использования АВБС и ВОД с преобразованием поперечных сил в продольные де-

формации, усовершенствовать методы установки оптического волокна в обмотку, чтобы предотвратить обрыв волокна при её деформации. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последние несколько лет в распределенных ВОД, нами предложены их модификации с уточнением калибровочных точек с помощью АВБС [30, 31].

Метод определения вибрации в СТ с помощью различного типа АВБС представлен нами в работах [32, 33]. Задача состоит в том, как упростить и миниатюризировать систему, чтобы снизить её стоимость. Кроме того, вибрация более важна для мониторинга, поскольку она является постоянным источником механических проблем. Разработка небольшого и надёжного оптического датчика вибрации является сложной задачей.

**Заключение.** В работе представлены принцип действия и типовая конструкция поляризационного ВОД силы сжатия обмоток СТ на АВБС с радиофотонным опросом и компенсацией температуры. Чувствительность по разносу частот составляет 0,1 ГГц/Н в диапазоне измерения приложенных сил сжатия до 100 Н. Большой разнос частот можно получить, если использовать специальное поляризационно-поддерживающее волокно, чувствительность которого практически на порядок выше. Однако и стоимость датчика в этом случае будет выше.

Ранее решён ряд задач по применению АВБС волнового и фазового типов для реализации концепции Smart Grid Plus. Типовые структуры АВБС продолжают развиваться, поэтому могут быть найдены новые, более совершенные пути повышения эффективности мониторинга параметров надёжности СТ на их основе.

#### Список литературы

1. Волоконно-оптическая парадигма диагностического мониторинга цифровой энергетики. Основа концепции "SMART GRIDS PLUS" / Маскевич К.В., Мисбахов Р.Ш., Морозов О.Г. и др. // Фотон-экспресс. 2018. № 4 (148). С. 18-25.

2. Адресный волоконно-оптический датчик акустического обнаружения частичного разряда в комплектных распределительных устройствах / Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Электротехнические и информационные

- комплексы и системы. 2019. Т. 15, № 3. С. 101-110.
3. Адресный волоконно-оптический датчик для измерения относительной влажности в комплектных распределительных устройствах / Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Васёв, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Радиостроение. 2020. № 1. С. 1-16.
4. Волоконно-оптическая мультисенсорная система мониторинга комплектных распределительных устройств / П.Е. Денисенко, Е.П. Денисенко, Р.Ш. Мисбахов и др. // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 37.
5. Online frequency response analysis based on magnetic coupling to detect winding deformations in transformers / Y. Cheng, J. Bi, W. Chang et al. // High Volt. 2019. Vol. 5, iss. 3. Pp. 343-349.
6. Static and dynamic evaluation of a winding deformation FBG sensor for power transformer applications / de Melo A.G., Benetti D., de Lacerda L.A. et al. // Sensors. 2019. Vol. 19. Pp. 4877.
7. Online detection of windings distortion in power transformers by direct vibration measurement using a thin fiber optics sensor / Kung P., Idsinga R., Fu J.B. et al. // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2016. Pp. 576-578.
8. Kung P., Wang L., Comanici M.I. A comprehensive condition monitoring solution for the transformer // IEEE XXth International Conference on Electrical Machines. 2012. Pp. 1520-1525.
9. Research on a new fiber-optic axial pressure sensor of transformer winding based on fiber Bragg grating / Y. Liu, L. Li, L. Zhao et al. // Photonic Sensors. 2017. Vol. 7, iss. 4. Pp. 365-371.
10. Udd E. Fiber-grating sensors having longitudinal-strain-inducing jackets and sensor systems and structures including such sensors. Patent US, no. 9453771, 2016.
11. Transversal loading sensor based on tunable beat frequency of a dual-wavelength fiber laser / H. Fu, X. Shu, C. Mou et al. // IEEE Photonics Technology Letters. 2009. Vol. 21, iss. 14. Pp. 987-989.
12. Kong F., Li W., Yao J. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator // Opt. Lett. 2013. Vol. 38. Pp. 2611-2613.
13. A feasibility study of transformer winding temperature and strain detection based on distributed optical fibre sensors / Y. Liu, Y. Tian, X. Fan et al. // Sensors. 2018. Vol. 18. Pp. 3932.
14. Detection and identification of transformer winding strain based on distributed optical fiber sensing / Y. Liu, Y. Tian, X. Fan et al. // Appl. Optics. 2018. Vol. 57, iss. 22. Pp. 6430-6438.
15. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей / Р.Ш. Мисбахов, Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов и др. // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 24.
16. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems // Computer Optics. 2019. Vol. 43. No 4. Pp. 535-543.
17. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др. // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 1. С. 6-13.
18. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre / R.B. Wagreich, W.A. Atia, H. Singh et al. // Electron. Lett. 1996. Vol. 32. Pp. 1223-1224.
19. Lawrence C.M., Nelson D.V., Udd E. Measurement of transverse strains with fiber Bragg gratings // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3042. P. 218.
20. Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating / J.R. Dunphy, G. Meltz, M. Varasi et al. Patent US, no. 5399854, 1995.
21. Stepanov D.Yu., Canning J., Brodzeli Z. High-resolution measurements of fibre Bragg grating transmission spectra // European Conference on Optical Communication. 1998. Pp. 407-409.
22. Transverse load sensing by use of pi-phase-shifted fiber Bragg gratings / M. LeBlanc, S.T. Vohra, T.E. Tsai et al. // Optics Letters. 1999. Vol. 24. Pp. 1091-1093.
23. Simultaneous measurement of strain and load using a fiber laser sensor / L. Gao, L. Chen, L. Huang et al. // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 12. Pp. 1513-1517.
24. Heterodyning Fiber Grating Laser Sensors / B.O. Guan, L. Jin, Y. Zhang et al. // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30, iss. 8. Pp. 1097-1112.
25. Microfiber Fabry-Perot interferometer fabricated by taper-drawing technique and its application as a radio frequency interrogated refractive index sensor / J. Zhang, Q. Sun, R. Liang et al. // Optics Letters. 2012. Vol. 37, iss. 14. Pp. 2925-2927.
26. Spatial characterization of fiber Bragg grating structures using transversal pressure / R.N. Nogueira, I. Abe, A.J. Fernandes et al. // Opt. Commun. 2006. Vol. 259. Pp. 110-114.
27. Fiber Bragg grating (FBG) characterization and shaping by local pressure / de Matos C.J.S., Torres P., Valente L.C.G. et al. // J. Lightw. Technol. 2001. Vol. 19, iss. 8. Pp. 1206-1211.
28. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
29. Постановка задач проектирования волоконно-оптических комбинированных датчиков и много-сенсорных систем для регионального мониторинга концентрации парниковых газов / А.Р. Шагидуллин, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 4 (52). С. 52-67.
30. Misbahov R.S. Combined Raman DTS and address FBG sensor system for distributed and point temperature and strain compensation measurements // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. 2019. Pp. 64-68.

31. *Misbakhov R.S.* Combined Brillouin OFDA and address FBG sensor system for distributed and point temperature measurements // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. 2019. Pp. 69-74.

32. Вибродиагностика электродвигателя с использованием адресных волоконных брэгговских

решеток / И.Ю. Муравьев, А.Е. Добрыдин, А.А. Кузнецов и др. // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 410-411.

33. *Липатников К.А.* Система вибродиагностики технически сложных объектов на основе адресных волоконных брэгговских структур // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 424-425.

Статья поступила в редакцию 07.11.2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 15.12.2022

### Информация об авторах

*МОРОЗОВ Олег Геннадьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – волоконно-оптические технологии, радиофизика, радиофотоника, микроволновые технологии, распределённые сенсорные системы, квантовые технологии. Автор 840 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4779-4656>

*МИСБАХОВ Рустам Шаукатович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – интеллектуальные телекоммуникации, волоконно-оптические датчики. Автор 55 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0742-7827>

*МИСБАХОВ Ринат Шаукатович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – интеллектуальная энергетика, волоконно-оптические датчики. Автор 253 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-8810>

*ИВАНЕНКО Владимир Александрович* – аспирант кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – интеллектуальная энергетика, волоконно-оптические датчики. Автор 25 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1731-1273>

*КУЛИКОВ Евгений Владимирович* – аспирант кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – волоконная оптика и сенсорика. Автор 25 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3825-8862>

*ПОТАНИН Андрей Александрович* – аспирант кафедры радиофотоники и микроволновых технологий, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – волоконно-оптические датчики. Автор 10 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1181-3491>

*КУВШИНОВ Никита Евгеньевич* – инженер научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – микроволновые технологии, волоконно-оптические сенсоры. Автор 25 научных публикаций и патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7924-3344>

### Вклад авторов:

*Морозов О. Г.* – концептуализация, методология, написание – просмотр и редактирование, привлечение финансирования.

*Мисбахов Рус. М.* – методология, администрирование проекта.

*Мисбахов Рин. Ш.* – методология.

*Иваненко В. А.* – математическое обеспечение, проверка, формальный анализ, моделирование, написание – просмотр и редактирование, администрирование проекта.

*Куликов Е. В.* – математическое обеспечение, проверка, формальный анализ, моделирование.

*Потанин А. А.* – написание – подготовка оригинала черновика.

*Кувшинов Н. Е.* – написание – подготовка оригинала черновика.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.38>

### Polarization Fiber-Optic Compression Force Control Sensor for Transformer with Radio-Photonic Addressing Interrogation

O. G. Morozov<sup>✉</sup>, Rus. Sh. Misbakhov, Rin. Sh. Misbakhov,  
V. A. Ivanenko, E. V. Kulikov, A. A. Potanin, N. E. Kuvshinov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
10, K.Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation  
OGMorozov@kai.ru<sup>✉</sup>

**Keywords:** radio photonics; energy; power transformers; winding; compression control; fiber optic sensor; addressable fiber Bragg structures of wave and phase types; processing in the radio range of frequency information received in the optical range

#### ABSTRACT

**Introduction.** The authors' attention is focused on the most expensive component of power transmission links - the power transformer (PT) - and specifically, on the task of controlling its winding deformations and compression force through the use of fiber optic sensors (FOS). The main market for PT winding control in Russia is primarily centered on temperature control systems. However, lightning and arc discharges, as well as short circuits, can generate large currents that result in significant mechanical deformation of the PT windings, even more so than temperature. There are three types of optical methods for detecting PT winding deformations, based on intrafiber Fabry-Perot interferometers, fiber Bragg gratings (FBGs), and distributed FOS that utilize the Brillouin or Raman effect. Each method has its own advantages and disadvantages. The **goal** of this paper is to establish scientifically sound principles for designing a fiber-optic sensor (FOS) for controlling the compression force of a new type of PT windings. The proposed FOS uses radio photon interrogation and two AFBS of various types (wave and phase) to enhance the measurement resolution, sensitivity, and temperature compensation. **Methods.** This paper introduces the use of phase-type AFBS ( $2\pi$ -AFBS) as a transverse compression force sensor for the first time. When exposed to transverse compression force, it becomes possible to measure the frequency separation of the  $2\pi$ -AFBS transparency windows into two orthogonal components while maintaining sensor addressability. The relationship between shear force and the beat frequency between the components, which lies in the microwave range, is highly linear. The compression zone also includes a wave AFBS ( $2\pi$ -AFBS) that serves to balance functions and measure temperature. Unlike the phase-type AFBS, the polarization separation in the wave AFBS is not significant due to a much larger reflection band than the transmission bandwidth of the transparency windows. **Conclusion.** In this study, we presented and evaluated the performance of a polarization fiber-optic sensor (FOS) for controlling the compression force of power transformer (PT) windings using wave and phase types of addressable fiber Bragg structures (AFBS) with radio photon interrogation and temperature compensation. Experimental results showed that the frequency separation sensitivity for SMF-28 telecommunication fiber was 0.1 GHz/N for compression forces up to 100 N. By using a specialized polarization-supporting fiber, the frequency separation sensitivity can be increased by almost an order of magnitude, albeit at a higher cost. We have addressed several challenges with wave and phase type AFBS that can also be applied to PTs. Given the ongoing developments in AFBS standard structures, they have the potential to provide more advanced and efficient monitoring of PT reliability parameters.

**Funding:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the «Priority 2030» program.

#### REFERENCES

1. Maskevich K.V., Misbakhov R.Sh., Morozov O.G. et al. Volokonno-opticheskaya paradigma diagnosticheskogo monitoringa cifrovoj energetiki. Osnova koncepcii "SMART GRIDS PLUS" [Fiber-optic paradigm of diagnostic monitoring of digital energy. The basis of the "SMART GRIDS PLUS" concept]. *Foton-ekspres* [Photon-express]. 2018. No. 4 (148). Pp. 18-25. (In Russ.).
2. Misbakhov R.Sh., Vasyov A.N., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Adresnyj volokonno-opticheskij datchik akusticheskogo obnaruzheniya chastichnogo razryada v komplektnyh raspredelitel'nyh ustrojstvah

[Addressable fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharge in switchgear]. *Elektrotehnicheskije i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems]. 2019. Vol. 15, No. 3. Pp. 101-110. (In Russ.).

3. Misbakhov R.Sh., Vasyov A.N., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Adresnyj volokonno-opticheskiy datchik dlya izmereniya odnositel'noj vlazhnosti v komplektnyh raspredelitel'nyh ustrojstvah [Addressable fiber optic sensor for measuring relative humidity in complete switchgears]. *Radiostroenie* [Radioengineering]. 2020. No. 1. Pp. 1-16. (In Russ.).

4. Denisenko P.E., Denisenko E.P., Misbakhov R.Sh. et al. Volokonno-opticheskaya multisenornaya sistema monitoringa komplektnyh raspredelitel'nyh ustrojstv [Fiber-optic multisensor monitoring system for complete switchgears]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2018. No. 4 (51). Pp. 37. (In Russ.).

5. Cheng Y., Bi J., Chang W. et al Online frequency response analysis based on magnetic coupling to detect winding deformations in transformers. *High Volt.* 2019. Vol. 5, iss. 3. Pp. 343-349.

6. de Melo A.G., Benetti D., de Lacerda L.A. et al. Static and dynamic evaluation of a winding deformation FBG sensor for power transformer applications. *Sensors.* 2019. Vol. 19. Pp. 4877.

7. Kung P., Idsinga R., Fu J.B. et al. Online detection of windings distortion in power transformers by direct vibration measurement using a thin fiber optics sensor. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC).* 2016. Pp. 576-578.

8. Kung P., Wang L., Comanici M.I. A comprehensive condition monitoring solution for the transformer. *IEEE XXth International Conference on Electrical Machines.* 2012. Pp. 1520-1525.

9. Liu Y., Li L., Zhao L. et al. Research on a new fiber-optic axial pressure sensor of transformer winding based on fiber Bragg grating. *Photonic Sensors.* 2017. Vol. 7, iss. 4. Pp. 365-371.

10. Udd E. Fiber-grating sensors having longitudinal-strain-inducing jackets and sensor systems and structures including such sensors. Patent US, no. 9453771, 2016.

11. Fu H., Shu X., Mou C. et al. Transversal loading sensor based on tunable beat frequency of a dual-wavelength fiber laser. *IEEE Photonics Technology Letters.* 2009. Vol. 21, iss. 14. Pp. 987-989.

12. Kong F., Li W., Yao J. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator. *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38. Pp. 2611-2613.

13. Liu Y., Tian Y., Fan X. et al. A feasibility study of transformer winding temperature and strain detection based on distributed optical fibre sensors. *Sensors.* 2018. Vol. 18. Pp. 3932.

14. Liu Y., Tian Y., Fan X. et al. Detection and identification of transformer winding strain based on distributed optical fiber sensing. *Appl. Optics.* 2018. Vol. 57, iss. 22. Pp. 6430-6438.

15. Misbahov Rus.Sh., Misbahov Rin.Sh., Morozov O.G. et al. Volokonnye breggovskie reshetki s dvumya fazovymi sdvigami kak chuvstvitel'nyj element i instrument multipleksirovaniya sensoryh setej [Fiber Bragg gratings with two phase shifts as a sensitive element and a tool for sensor networks multiplexing]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2017. No. 3 (46). P. 24. (In Russ.).

16. Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. *Computer Optics.* 2019. Vol. 43, No. 4. Pp. 535-543.

17. Agliullin T.A., Anfinogentov V.I., Misbahov R.Sh. et al. Mnogoadresnye volokonnye breggovskie struktury v radiofotonnyh sensoryh sistemah [Multicast Fiber Bragg Structures in Radio-Photonic Sensor Systems]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi* [Proceedings of Telecommunication Universities]. 2020. Vol. 6, No. 1. Pp. 6-13. (In Russ.).

18. Wagneich R.B., Atia W.A., Singh H. et al. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre. *Electron. Lett.* 1996. Vol. 32. Pp. 1223-1224.

19. Lawrence C.M., Nelson D.V., Udd E. Measurement of transverse strains with fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE.* 1997. Vol. 3042. Pp. 218.

20. Dunphy J.R., Meltz G., Varasi M. et al. Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating. Patent US, no. 5399854, 1995.

21. Stepanov D.Yu., Canning J., Brodzeli Z. High-resolution measurements of fibre Bragg grating transmission spectra. *European Conference on Optical Communication.* 1998. Pp. 407-409.

22. Transverse load sensing by use of pi-phase-shifted fiber Bragg gratings / M. LeBlanc, S.T. Vohra, T.E. Tsai et al. // *Optics Letters.* 1999. Vol. 24. Pp. 1091-1093.

23. Gao L., Chen L., Huang L. et al. Simultaneous measurement of strain and load using a fiber laser sensor. *IEEE Sensors Journal.* 2012. Vol. 12. Pp. 1513-1517.

24. Guan B.O., Jin L., Zhang Y. et al. Heterodyning Fiber Grating Laser Sensors. *Journal of Lightwave Technology.* 2012. Vol. 30, iss. 8. Pp. 1097-1112.

25. Zhang J., Sun Q., Liang R. et al. Microfiber Fabry-Perot interferometer fabricated by taper-drawing technique and its application as a radio frequency interrogated refractive index sensor. *Optics Letters.* 2012. Vol. 37, iss. 14. Pp. 2925-2927.

26. Nogueira R.N., Abe I., Fernandes A.J. et al. Spatial characterization of fiber Bragg grating structures using transversal pressure. *Opt. Commun.* 2006. Vol. 259. Pp. 110-114.

27. de Matos C.J.S., Torres P., Valente L.C.G. et al. Fiber Bragg grating (FBG) characterization and shaping by local pressure. *J. Lightw. Technol.* 2001. Vol. 19, iss. 8. Pp. 1206-1211.

28. Varzhel' S.V. Volokonnye breggovskie reshetki [Fiber Bragg gratings]. SPb., ITMO Publ., 2015. 65 p. (In Russ.).

29. Shagidullin A.R., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Zh. et al. Postanovka zadach proektirovaniya volokonno-opticheskikh kombinirovannykh datchikov i mnogosensornykh sistem dlya regional'nogo monitoringa koncentracii parnikovyykh gazov [Statement of problems of designing fiber-optic combined sensors and multi-sensor systems for regional monitoring of greenhouse gas concentrations]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2021. No. 4 (52). Pp. 52-67. (In Russ.).

30. Misbakhov R.S. Combined Raman DTS and address FBG sensor system for distributed and point temperature and strain compensation measurements.

*International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 2019. Pp. 64-68.

31. Misbakhov R.S. Combined Brillouin OFDA and address FBG sensor system for distributed and point temperature measurements. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 2019. Pp. 69-74.

32. Murav'ev I.Yu., Dobrydin A.E., Kuznetsov A.A. et al. Vibrodiagnostika elektrodvigatelya s ispol'zovaniem adresnykh volokonnykh breggovskikh reshetok [Vibrodiagnostics of an electric motor using addressable fiber Bragg gratings]. *Foton-ekspress* [Photon-express]. 2021. No. 6 (174). Pp. 410-411. (In Russ.).

33. Lipatnikov K.A. Sistema vibrodiagnostiki tekhnicheskii slozhnykh ob"ektov na osnove adresnykh volokonnykh breggovskikh struktur [Vibrodiagnostics system for technically complex objects based on addressable fiber Bragg structures]. *Foton-ekspress* [Photon-express]. 2021. No. 6 (174). Pp. 424-425. (In Russ.).

The article was submitted 07.11.2022; approved after reviewing 23.11.2022; accepted for publication 15.12.2022

**For citation:** Morozov O. G., Misbakhov Rus. Sh., Misbakhov Rin. Sh., Ivanenko V. A., Kulikov E. V., Potanin A. A., Kuvshinov N. E. Polarization Fiber-Optic Compression Force Control Sensor for Transformer with Radio-Photonic Addressing Interrogation. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2022. No. 4 (56). Pp. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.4.38>

#### Information about the authors

*Oleg G. Morozov* – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies at Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – fiber optic technologies, radio physics, radio photonics, microwave technologies, distributed sensor systems, quantum technologies. The author of 840 publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4779-4656>

*Rustam Sh. Misbakhov* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – smart telecommunications, fiber optic sensors. The author of 55 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0742-7827>

*Rinat Sh. Misbakhov* – Doctor of Engineering Sciences, associated professor, professor at the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies at Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – smart energy, fiber optic sensors. The author of 253 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-8810>

*Vladimir A. Ivanenko* – postgraduate student at the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – smart energy, fiber optic sensors. The author of 25 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1731-1273>

*Evgeny V. Kulikov* – postgraduate student at the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – fiber optics and sensorics. The author of 25 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3825-8862>

*Andrey A. Potanin* – postgraduate student at the Department of Radio Photonics and Microwave Technologies, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – fiber optic sensors. The author of 10 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1181-3491>

*Nikita E. Kuvshinov* – engineer at the R&D Institute of Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests – microwave technologies, fiber optic sensors. The author of 25 scientific publications and patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7924-3344>

**Contribution of authors:**

*Morozov O. G.* – contributed to the conceptualization, methodology, and writing, as well as reviewing and editing, and fundraising.

*Misbakhov R. Sh.* – assisted with methodology and project administration.

*Misbakhov R. Sh.* – contributed to the methodology.

*Ivanenko V. A.* – developed software, performed verification, formal analysis, and modeling, and assisted with writing, reviewing, and editing, as well as project administration.

*Kulikov E. V.* – contributed to software development, verification, formal analysis, and modeling.

*Potanin A.A.* – contributed to writing by preparing the original manuscript.

*Kuvshinov N.E.* – contributed to writing by preparing the original manuscript.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.