

УДК 535.5:530.182

**А.М. Брезгина<sup>2</sup>, Д.Г. Ризванов<sup>2</sup>, Н.С. Созонов<sup>2</sup>,  
А.А. Оглезнев<sup>1,2</sup>, А.В. Перминов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ**

Представлены конструкция и результаты испытаний волоконно-оптического диэлектрического датчика температуры, предназначенного для использования в условиях воздействия внешнего электромагнитного поля и агрессивных сред.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик температуры, волоконная брэгговская решетка, электромагнитное поле, температурные испытания, абсолютная погрешность.

**A.M. Brezgina<sup>2</sup>, D.G. Rizvanov<sup>2</sup>, N.S. Sozonov<sup>2</sup>,  
A.A. Ogleznev<sup>1,2</sup>, A.V. Perminov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Inversion-Sensor, Perm, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE OPERATION OF A FIBER-OPTIC DIELECTRIC TEMPERATURE SENSOR**

The article presents the design and test results of a fiber-optic dielectric temperature sensor intended for use under the influence of external electromagnetic field and aggressive environment.

**Keywords:** fiber-optic temperature sensor, fiber Bragg grating, electromagnetic field, temperature tests, absolute error.

### **Введение**

В настоящее время возникает потребность в непрерывном мониторинге инженерных сооружений, например силовых трансформаторных установок, для повышения надежности их работы и уменьшения вероятности аварийной ситуации [1]. Силовой трансформатор

(СТ) является источником сильного внешнего электромагнитного поля. Силовые трансформаторы играют жизненно важную роль в системах цифровой электроэнергетики, а именно передачи энергии от источника до центра потребления. Диагностика производительности СТ на месте дает множество преимуществ для обеспечения передачи электроэнергии с высокой надежностью в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61850, ГОСТ Р МЭК 60870, ГОСТ Р 51317 (МЭК 61000), ГОСТ Р 55191 (МЭК 60270) [2].

Невосприимчивость к электромагнитным помехам [3–8], высокая чувствительность, высокая изоляция, а также малые габариты оптического датчика делают его очень привлекательным для применения в мониторинге СТ. Кроме того, внутреннее пространство трансформатора заполняется трансформаторным маслом, являющимся агрессивной внешней средой, к которой, согласно [9–11], оптоволоконный датчик также устойчив.

Существуют известные зарубежные оптические системы мониторинга силовых трансформаторов таких известных компаний, как Qualitrol (США), НВМ FiberSensing (Португалия), MESSKO (Германия) и др. Но постепенное старение оборудования и ряд экономических и внешнеполитических причин делают актуальным необходимость импортозамещения волоконно-оптических датчиков температуры, применяемых в технических системах на территории Российской Федерации.

Целью работы является исследование диэлектрического датчика температуры (ДДТ) на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР), предназначенного для работы в силовых трансформаторах.

ВБР представляет собой участок световода с периодическим изменением показателя преломления вдоль оси. ВБР отражает свет определенной длины волны. Она является одним из наиболее распространенных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков. В сравнении с традиционно применяемыми электрическими датчиками ВБР обладают рядом преимуществ: более компактны, не подвержены электромагнитным помехам, интегрируются в единое оптическое волокно [12]. Также можно выделить ряд преимуществ в сравнении с альтернативными отражающими элементами (интерференционными зеркалами, объемными дифракционными решетками): широкое разнообразие получаемых спектральных и дисперсионных характеристик, многие из которых могут быть реализованы только на

основе волоконных решеток показателя преломления, полностью волоконное исполнение, низкие оптические потери, относительная простота изготовления и т.д. [13].

### 1. Постановка задачи

Конструкция разработанного датчика приведена на рис. 1. Корпус датчика выполнен из гетинакса ГОСТ 2718-74. В корпус были добавлены два сквозных отверстия для фиксации с двух сторон чувствительного элемента и отверстие в центре корпуса для обеспечения непосредственного контакта с объектом и обеспечения полной полимеризации защитного покрытия. При разработке датчика было предложено два типа конструкции чувствительного элемента (ЧЭ): ВБР, закрепленная в керамической трубке, и ВБР, закрепленная в кварцевом капилляре. ВБР в кварцевом капилляре является стандартным исполнением чувствительного элемента и не требует дополнительного технического оснащения. В таком исполнении ВБР сверху покрывается клеомгерметиком, что может делать чувствительный элемент менее устойчивым к воздействию агрессивных сред. Поэтому было принято решение об использовании керамической трубки для фиксации ВБР и сравнении результатов испытаний двух типов конструкции.

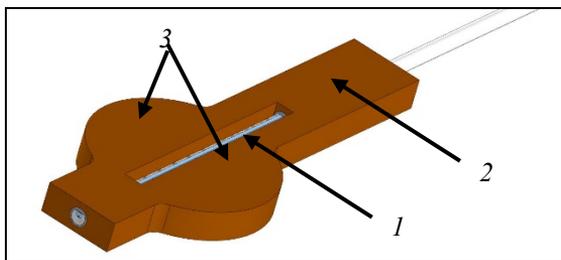


Рис. 1. Конструкция датчика: 1 – ВБР, 2 – диэлектрический корпус, 3 – монтажные ушки

В рамках работы было изготовлено 2 типа образцов датчика, показанных на рис. 2, с применением различных материалов:

тип 1 – керамическая трубка с ВБР;

тип 2 – кварцевый капилляр с ВБР.

Произведенные датчики прошли градуировку в диапазоне температур от минус 30 до плюс 150 °С, по результатам которой максимальная абсолютная погрешность каждого образца не превышает 0,7 °С.



а



б

Рис. 2. Внешний вид ДДТ: а – тип 1; б – тип 2

Для фиксации показаний ДДТ были подключены к анализатору сигналов волоконно-оптических датчиков с погрешностью измерения  $\pm 2$  нм. Зависимости показаний ДДТ от показаний термометра сопротивления (испытания проводились совместно с ПТСВ-6м-3, имеющего регистрационный номер 57690-14 в государственном реестре средств измерений) аппроксимировались полиномом 4-го порядка (рис. 3) и определялись градуировочные коэффициенты методом наименьших квадратов.

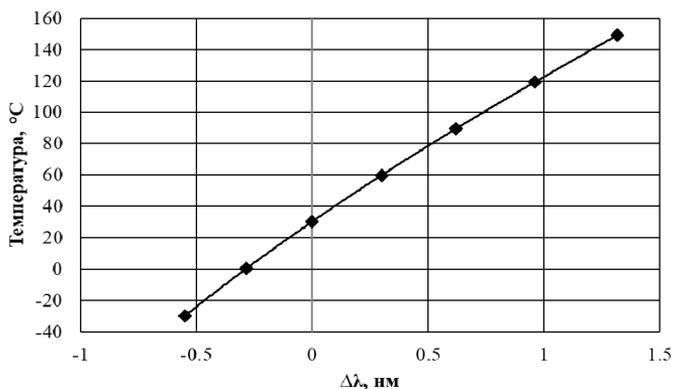


Рис. 3. Пример градуировочной кривой

На основании полученных градуировочных коэффициентов был выполнен пересчет показаний ДДТ (длины волн) в показания температуры, затем по формуле (1) была оценена абсолютная погрешность измерений:

$$\gamma = |T_{\text{ДДТ}} - T_{\text{ТС}}|, \quad (1)$$

где  $T_{\text{ДДТ}}$  – значение температуры, полученное на основании измерений ДДТ;  $T_{\text{ТС}}$  – значение температуры, полученное с термометра сопротивления.

## 2. Испытания макетных образцов

Условия эксплуатации датчика накладывают дополнительные требования к стабильности показаний датчика. Необходимо обеспечить устойчивость датчика к воздействию масляной среды трансформатора и электромагнитного поля.

Для проверки стабильности показаний в нефтепродуктах, одномодовое оптическое волокно с ВБР было погружено в бензин «Калоша» и выдержано в нем в течение двух суток. Спектры ВБР до и после воздействия агрессивной среды приведены на рис. 4. В результате воздействия длина волны осталась неизменной, что свидетельствует о невосприимчивости ВБР к воздействию бензина.

В линию «анализатор сигналов – ВБР» были внесены потери (на волокне была сделана петля диаметром 30 мм) для более наглядной демонстрации длины волны до и после испытания, поэтому спектр ВБР после воздействия бензина на графике ниже, чем спектр ВБР до воздействия бензина.

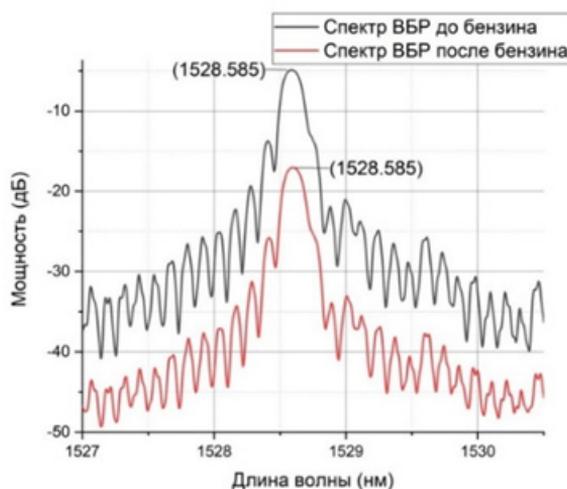


Рис. 4. Спектры ВБР до и после воздействия агрессивной среды

Испытания во внешнем электромагнитном поле проводились в кольцах Гельмгольца с изменением магнитной индукции катушек от 0 до 2,8 мкТл с шагом 0,28 мкТл. Датчики фиксировали температуру окружающей среды. При максимальном напряжении автотрансформатора показания датчика типа 1 изменились не более чем на 0,1 °С, что не превышает погрешности датчиков и может быть обусловлено реальным изменением температуры воздуха в помещении, показания датчика типа 2 не изменились.

Таким образом, проведенные испытания демонстрируют работоспособность датчика в условиях трансформатора.

### 3. Сравнительные испытания с зарубежными аналогами

Следующим этапом работы было проведение одновременных испытаний изготовленных датчиков с зарубежными аналогами (далее – датчика типа 3). Внешний вид датчика приведен на рис. 5. Корпус датчика выполнен из электроизоляционного картона. Чувствительный элемент ВБР защищен полиимидной трубкой.



Рис. 5. Внешний вид зарубежного диэлектрического датчика температуры

В результате испытаний характеристики разработанного диэлектрического датчика температуры не уступают зарубежным аналогам, а по абсолютной погрешности и рабочему температурному диапазону даже превосходят их. Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице. Разработанные датчики имеют более широкий температурный диапазон и меньшую погрешность, что делает их более привлекательными для заказчика.

Сравнительные температурные испытания проводились в климатической камере в температурном диапазоне от –30 до +150 °С с использованием термометра сопротивлений ПТСВ-6м-3. Результаты теста приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, зарубежный датчик (тип 3) дает более точные показания в области высоких температур, но в его рабочий диапазон не входят отрицательные температуры, что является сущест-

венным преимуществом ДДТ (тип 1 и 2). ДДТ типа 1 показывает более предсказуемую (линейную) погрешность на различных температурных полках, чем ДДТ типа 2. Разница погрешностей ДДТ типа 1 и типа 2 не превышает 0,2 °С, что можно считать близкими и малыми по сравнению с заявленной погрешностью.

### Сравнение заявленных характеристик датчиков

Наименование характеристики датчика	Значение	
	Тип 3	Тип 1, 2
Рабочий диапазон температур, °С	от +35 до +200	от -30 до +150
Абсолютная погрешность, не более, °С	1,2	0,7
Габариты, мм	55×12×4	60×24×4

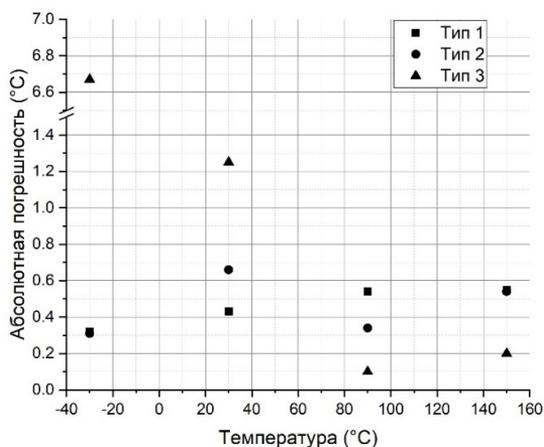


Рис. 6. Результаты сравнительного температурного теста (по оси абсолютной погрешности присутствует разрыв)

Разработанный в рамках данной работы оптоволоконный диэлектрический датчик температуры благодаря использованию специального клея для закрепления ВБР позволяет расширить диапазон рабочих температур датчика до -30 °С и сохранять точные показания до +150 °С.

Сравнительные испытания во внешнем электромагнитном поле проводились в кольцах Гельмгольца по ранее описанной методике. Изменение показаний зарубежного аналога (тип 3) также не превышает 0,1 °С. Таким образом, можно сделать вывод, что влияние электромагнитного поля на показания ДДТ и его зарубежного аналога пренебрежимо мало по сравнению с заявленной погрешностью.

### Заключение

Разработано два типа диэлектрического датчика температуры (ДДТ) на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР), предназначенного для работы в силовых трансформаторах при температурах окружающей среды от минус 30 до плюс 150 °С. Были изготовлены и испытаны опытные образцы двух типов разработанного датчика, проведена проверка на устойчивость к воздействию агрессивной среды, проведены сравнительные испытания с зарубежным аналогом, показывающие, что предложенные типы датчика имеют абсолютную погрешность не более 0,7 °С в заявленном диапазоне температур. Датчики с различным типом закрепления ВБР в корпусе показали близкие результаты во время проведения испытаний, из чего можно сделать вывод о незначительности этого параметра при разработке датчика температуры и возможности использования наиболее удобного в производстве типа чувствительного элемента, а именно кварцевого капилляра с ВБР.

Таким образом, предложенный датчик типа 2 полностью соответствует заявленным требованиям и может быть эффективно использован вместо импортного аналога в условиях внешнего электромагнитного поля и агрессивных сред силового трансформатора.

### Список литературы

1. Русов В.А. Мониторинг сухих и маслонаполненных распределительных трансформаторов 6-35 кВ в условиях цифровых подстанций // Энергоэксперт. – 2019. – № 1(69). – С. 44–47.
2. Контроль температуры и геометрии шин обмоток силовых трансформаторов. Постановка задачи научных исследований / В.А. Иваненко, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Рус.Ш. Мисбахов, В.И. Артемьев, А.М. Телишев // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 79–85.
3. Чичев С.И., Глинкин Е.И. Новое применение оптического волокна в температурном мониторинге обмоток силовых трансформаторов // Вестник ТГУ. – 2011. – Т. 16, вып. 2. – С. 493–495.
4. Лазарев Г., Габриелян Ю., Новаковский А. Применение оптоволоконных систем для прямого измерения температуры высоковольтных силовых трансформаторов // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 92–95.

5. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers / Jiangdong Denga, Hai Xiaob, Wei Huoa, Ming Luob, Russ Maya, Anbo Wanga, Yilu Liua // Optics & Laser Technology. – 2001. – Vol. 33, № 5. – P. 305–311.

6. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods [Электронный ресурс] / Junhao Li, Xutao Han, Zehui Liu, Xiu Yao. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7776945> (дата обращения: 18.04.2022).

7. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG [Электронный ресурс] / M.A. Guo-ming, Zhou Hong-yang, Shi Cheng, Li Ya-bo, Zhang Qiang, Li Cheng-rong, Zheng Qing. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8283621> (дата обращения: 18.04.2022).

8. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer [Электронный ресурс] / Hong-yang Zhou, Guo-ming Ma, Meng Zhang, Han-chi Zhang, Cheng-rong Li. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8891750> (дата обращения: 18.04.2022).

9. Овчинникова И.А. Влияние агрессивных сред на конструктивные элементы оптических кабелей // Электросвязь. – 2013. – № 16. – С. 42–45.

10. Гарвичев В.Д. Волоконно-оптические измерители температуры для работы в условиях сильных электромагнитных помех: дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербург. нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики, СПб., 2016. – 168 с.

11. Волоконно-оптические сенсоры на основе резонанса затухающей моды для агрессивных жидкостей / Д.П. Судас, П.И. Кузнецов, Г.Г. Якушева, Е.А. Савельев // ВКВО-2021 – Волоконно-оптические датчики. Спецвып. Фотон-Экспресс-Наука-2021. – 2021. – № 6. – С. 286–287.

12. Применение волоконных брэгговских решеток для определения деформации авиационных и строительных конструкций из полимерных композиционных материалов / В.В. Махсидов, Л.А. Кашарина, А.А. Евдокимов, А.Е. Раскутин // Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 258–271.

13. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.

## References

1. Rusov V.A. Monitoring sukhikh i maslonapolnennykh raspredelitel'ny transformatorov 6-35 kV v usloviakh tsifrovyykh podstantsii [Monitoring of dry and oil-filled distribution transformers 6-35 kV in digital substations]. *Energoekspert*, 2019, vol. 1, no. 69, pp. 44-47.

2. Ivanenko V.A., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Z., Misbakhov R.S., Artem'ev V.I., Telishev A.M. Kontrol' temperatury i geometrii shin obmotok silovykh transformatorov. Postanovka zadachi nauchnykh issledovaniy [Monitoring the temperature and geometry of the busbars of the windings of power transformers. Statement of the scientific research problem]. *Electronics, photonics and cyber-physical systems*, 2022, vol. 2, no. 4, pp. 79-85.

3. Chichev S.I., Glinkin E.I. Novoe primeneniye opticheskogo volokna v temperaturnom monitoringe obmotok silovykh transformatorov [New application of optical fiber in temperature monitoring of power transformer windings]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, vol. 16, iss. 2, pp. 493-495.

4. Lazarev G., Gabrielian Iu., Novakovskii A. Primeniye optovolokonnykh sistem dlia priamogo izmereniia temperatury vysokovol'tnykh silovykh transformatorov [Application of fiber optic systems for direct temperature measurement of high-voltage power transformers]. *Silovaia elektronika*, 2007, no. 4, pp. 92-95.

5. Deng J., Xiao H., Huo W., Luo M., May R., Wang A., Liu Y. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers. *Optics & Laser Technology*, 2001, vol. 33, no. 5, pp. 305-311.

6. Li J., Han X., Liu Z., Yao X. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7776945> (accessed 18 April 2022).

7. Ma G.-M., Zhou H.-Y., Shi C., Li Y.-B., Zhang Q., Li C.-R., Zheng Q. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8283621> (accessed 18 April 2022).

8. Zhou H.-Y., Ma G.-M., Zhang M., Zhang H.-C., Li C.-R. A high sensitivity optical fiber interferometer sensor for acoustic emission detection of partial discharge in power transformer, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8891750> (accessed 18 April 2022).

9. Ovchinnikova I.A. Vliianie aggressivnykh sred na konstruktivnye elementy opticheskikh kabelei [The influence of aggressive environments on structural elements of optical cables]. *Elektrosviaz'*, 2013, no. 16, pp. 42-45.

10. Garvichev V.D. Volokonno-opticheskie izmeriteli temperatury dlia raboty v usloviakh sil'nykh elektromagnitnykh pomekh [Fiber optic temperature meters for high electromagnetic interference environments]. Ph. D thesis. *Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, 168 p.

11. Sudas D.P., Kuznetsov P.I., Iakusheva G.G., Savel'ev E.A. Volokonno-opticheskie sensory na osnove rezonansa zatukhaiushchei mody dlia agressivnykh zhidkosti [Fiber-optic sensors based on decaying mode resonance for aggressive liquids]. *All-Russian Conference on Fiber Optics - 2021, (ARCFO-2021)*. Foton Ekspress, 2021, vol. 6, no. 174, pp. 286-287.

12. Makhsidov V.V., Kasharina L.A., Evdokimov A.A., Raskutin A.E. Primenenie volokonnykh breggovskikh reshetok dlia opredeleniia deformatsii aviatsionnykh i stroitel'nykh konstruksii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Application of fibre bragg gratings for strain measurement of aviation and building structures based on polymer matrix composite]. *Applied Photonics*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 258-271.

13. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Bozhkov A.S., Kurkov A.S., Dianov E.M. Volokonnye reshetki pokazatel'ia prelomleniia i ikh primeneniia [Refractive index fiber gratings and their applications]. *Kvantovaya Elektronika*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.

#### **Сведения об авторах**

**БРЕЗГИНА А.М.**

e-mail: [brezgina@i-sensor.ru](mailto:brezgina@i-sensor.ru)

Аспирантка кафедры, инженер-конструктор 2-й категории ООО «Инверсия-Сенсор», ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

**РИЗВАНОВ Д.Г.**

e-mail: [rizvanov@i-sensor.ru](mailto:rizvanov@i-sensor.ru)

Начальник КБ по датчикам на основе ВБР ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь.

#### **About the authors**

**BREZGINA A.M.**

e-mail: [brezgina@i-sensor.ru](mailto:brezgina@i-sensor.ru)

Design engineer 2 cat. LLC "Inversion-Sensor", post-graduate student of the LINS Department of SPbSETU "LETI".

**RIZVANOV D.G.**

e-mail: [rizvanov@i-sensor.ru](mailto:rizvanov@i-sensor.ru)

Head of the Design Bureau for sensors based on UBR LLC "Inversion-Sensor".

**СОЗОНОВ Н.С.**

e-mail: [sozonov@i-sensor.ru](mailto:sozonov@i-sensor.ru)

Инженер-конструктор 2-й категории  
ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь.

**SOZONOV N.S.**

e-mail: [sozonov@i-sensor.ru](mailto:sozonov@i-sensor.ru)

Design engineer 2 cat. LLC "Inversion-Sensor".

**ОГЛЕЗНЕВ А.А.**

e-mail: [ogleznev@i-sensor.ru](mailto:ogleznev@i-sensor.ru)

Технический директор ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь.

**OGLEZNEV A.A.**

e-mail: [ogleznev@i-sensor.ru](mailto:ogleznev@i-sensor.ru)

Technical Director LLC "Inversion-Sensor".

**ПЕРМИНОВ А.В.**

e-mail: [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru)

Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.

**PERMINOV A.V.**

e-mail: [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru)

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General Physics of Perm National Research Polytechnic University.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 31.08.2023

**Одобрена:** 06.09.2023

**Принята к публикации:** 10.09.2023

**Financing.** The study was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions.** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 31/08/2023

**Approved:** 06/09/2023

**Accepted for publication:** 10/09/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Исследование влияния внешних воздействующих факторов на работу волоконно-оптического диэлектрического датчика температуры / А.М. Брезгина, Д.Г. Ризванов, Н.С. Созонов, А.А. Оглезнев, А.В. Перминов // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 75–86.

Please cite this article in English as: Brezgina A.M., Rizvanov D.G., Sozonov N.S., Ogleznev A.A., Perminov A.V. Investigation of the influence of external factors on the operation of a fiber-optic dielectric temperature sensor // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 75-86.