

DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.05

УДК 51-74

**А.И. Кривошеев<sup>1</sup>, Ю.А. Константинов<sup>1</sup>,  
В.П. Первадчук<sup>2</sup>, Ф.Л. Барков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский федеральный исследовательский центр  
УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **КОМБИНИРОВАННЫЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМУМА БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СПЕКТРА В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ**

Распределенные оптоволоконные датчики становятся все более распространенным решением в вопросах контроля и диагностики протяженных линий передачи информации, промышленных приспособлений, строений и аппаратов. Одно из направлений – бриллюэновская рефлектометрия, позволяющая диагностировать волоконную линию на предмет изменения температуры окружающей среды или механической деформации, становится все более популярна среди инженеров и исследователей. Однако современные стандарты предъявляют к системам диагностики все более строгие требования в плане точности определения диагностируемых параметров. Для бриллюэновской рефлектометрии, где значение параметров окружающей среды определяется положением максимума спектра усиления Манделъштама – Бриллюэна, становится на главе задача более точного определения этого максимума.

Рассмотрены современные компьютерно-вычислительные методы детектирования максимума спектра усиления Манделъштама – Бриллюэна в оптическом волокне. Авторы отмечают, что несовершенства формы оптического спектра, такие как соотношение сигнал/шум, а также возможные цифровые дефекты, возникающие в процессе оцифровки, могут значительно ухудшить точность системы. Авторами рассмотрены три подхода к детектированию максимума спектра: классический метод аппроксимации лоренцевой функцией, метод кросс-корреляции с идеальной функцией Лоренца, а также разработанный авторами ранее метод обратной корреляции.

Для объединения результатов работы трех методов была разработана нейросетевая модель, которая принимает на вход данные каждого метода, совместно с параметрами зашумления и искажения спектра. Модель представлена в виде четырехслойного перцептрона с двумя скрытыми слоями. В результате работы модели авторами достигнуто увеличение точности определения положения максимума спектра на 10 % на модельных данных.

**Ключевые слова:** нейронные сети, нейросетевое моделирование, распределенные датчики, оптическое волокно, бриллюэновская рефлектометрия, спектр усиления Манделъштама – Бриллюэна, максимум спектра, бриллюэновский сдвиг, цифровая обработка сигнала, корреляционный анализ, метод обратной корреляции.

**A.I. Krivosheev<sup>1</sup>, Yu.A. Konstantinov<sup>1</sup>,  
V.P. Pervadchuk<sup>2</sup>, F.L. Barkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,  
Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **COMBINED NEURAL NETWORK METHOD FOR DETERMINING THE BRILLOUIN SPECTRUM MAXIMUM IN DISTRIBUTED FIBER-OPTIC SENSORS**

Distributed fiber-optic sensors are becoming an increasingly common solution for monitoring and diagnosing extended information transmission lines, industrial devices, buildings and devices. One of the directions – Brillouin reflectometry, which allows diagnosing a fiber line for changes in ambient temperature or mechanical deformation, is becoming increasingly popular for engineers and researchers. However, modern standards impose increasingly strict requirements on diagnostic systems in terms of the accuracy of determined parameters. For Brillouin reflectometry, where the value of the environmental parameters is determined by the position of the maximum of the Brillouin gain spectrum, the task of more accurately determining this maximum becomes the main one.

The paper considers modern computer-computational methods for detecting the maximum of the Brillouin gain spectrum in an optical fiber. The authors note that imperfections in the shape of the optical spectrum, such as the signal-to-noise ratio, as well as possible digital defects that occur during digitization, can significantly impair the accuracy of the system. The authors consider three approaches to detecting the maximum of the spectrum: the classical method of Lorentz curve fitting, the method of cross-correlation with the ideal Lorentzian function, as well as the method of inverse correlation developed by the authors earlier.

To combine the results of the work of the three methods, a neural network model was developed that accepts the input data of each method, together with the parameters of noise and distortion of the spectrum. The model is presented in the form of a four-layer perceptron with two hidden layers. As a result, the authors achieved an increase in the accuracy of determining the position of the maximum of the spectrum by 10% on the model data.

**Keywords:** neural networks, neural network modeling, distributed sensors, optical fiber, Brillouin reflectometry, Brillouin gain spectrum, spectrum maximum, Brillouin shift, digital signal processing, correlation analysis, backward correlation method.

Исследовательский интерес к бриллюэновской рефлектометрии временной области с точки зрения распределенного волоконного зондирования значительно вырос со времени ее открытия [1]. Распределенное волоконное зондирование позволяет получать непрерывную информацию о состоянии волоконной линии длиной до нескольких километров с использованием одного блока обработки. Это является большим преимуществом перед локальными [2] и квазираспределенными [3, 4] системами мониторинга. В основе бриллюэновской рефлектометрии лежит вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) в оптическом волокне, которое позволяет получить информацию о температуре

и деформации с высокой точностью и разрешением [5–7]. Суть метода заключается во взаимодействии импульсной волны накачки со встречной непрерывной зондирующей волной. Когда разность частот между волной накачки и зондирующей совпадает со значением сдвига бриллюэновской частоты оптического волокна, который составляет порядка 10 ГГц для кварцевых волокон, зондирующая волна испытывает усиление за счет ВРМБ. Во время внешних возмущений, таких как температура или деформация, бриллюэновский сдвиг в этой точке волокна будет смещен. Величина этого смещения несет в себе информацию о величине изменения температуры или деформации, воздействующей на оптическое волокно [8, 9]. Спектр бриллюэновского усиления рассеянного в волокне излучения может быть восстановлен путем сканирования частоты между волной накачки и зондирующей волной. Затем распределение бриллюэновского сдвига вдоль волоконной линии можно вычислить путем определения центральной частоты в спектре усиления.

Традиционно в системах мониторинга на основе бриллюэновского рассеяния центральную частотную компоненту в спектре усиления определяют путем аппроксимации функцией Лоренца, модель которой задается уравнением [10]:

$$g(\nu) = \frac{g_B}{1 + \left[ (\nu - \nu_B) / (\Delta\nu_B / 2) \right]^2}, \quad (1)$$

где  $\nu_B$  – значение бриллюэновского сдвига,  $\Delta\nu_B$  – ширина спектра усиления,  $g_B$  – амплитуда спектра усиления.

Такой метод сопряжен с некоторыми трудностями. К ним относятся высокие вычислительные затраты, а также тот факт, что точность метода определяется заданным изначально параметром точности системы, по достижении которой цель аппроксимации будет достигнута [11, 12].

Предложены также методы, не требующие задания первоначальных параметров. К ним относятся методы кросс-корреляции [12, 13], использующие идеальную функцию Лоренца, заданную по формуле (1), для вычисления функции корреляции между измеренным спектром усиления и идеальной кривой Лоренца. Тем не менее для этого все равно требуется генерация дополнительного спектра. Кроме того, метод остается чувствительным к шумам системы и величине шага частотного сканирования.

Недавно авторами был предложен новый метод [14], основанный на методе кросс-корреляции, но не требующий никаких дополнительных вводимых величин. Метод, названный методом обратной корреляции, использует тот же спектр, полученный в результате измерения, однако отраженный по оси абсцисс. Авторами было проведено исследование точности данного метода [15] в сравнении с традиционными аналогами. Показано, что метод имеет преимущества при наличии весомых несовершенств в измеренном спектре, таких как шумовая составляющая, а также различные искажения в спектре, которые могут быть вызваны дефектами оцифровки.

На сегодняшний день известно множество исследований по внедрению машинного обучения в бриллиантовые распределенные датчики в качестве альтернативы традиционным методам получения информации о температуре и деформации. Машинное обучение было успешно применено в таких сферах, как обработка изображений, распознавание образов, классификации и оптики. Машинное обучение зарекомендовало себя благодаря способности точно предсказывать решение, имея лишь несколько входных данных, которые было бы слишком сложно организовать в простую логическую цепочку. Модель строится и обучается, используя известный набор данных, как входных, так и выходных. В области бриллиантовой рефлектометрии исследуются такие направления машинного обучения, как искусственные нейронные сети [16], глубокие нейронные сети [17], а также метод опорных векторов [18].

Однако, несмотря на достоинства таких подходов, классические методы обработки информации, полученной с помощью бриллиантовых датчиков, более распространены в типовых аттестованных системах, использующихся в производственных и лабораторных целях. Такие методы имеют как преимущества, так и недостатки в зависимости от условий проведения измерения. При этом каждый несет в себе часть полезной информации об истинном положении центральной компоненты бриллиантового спектра.

Данная работа посвящена использованию нейронной сети для объединения информации, полученной с бриллиантового анализатора классическими способами, с целью увеличения точности определения максимума спектра бриллиантового сдвига.

В качестве входных параметров сети были использованы результаты трех методов поиска максимума спектра, а также значение отношения сигнал/шум спектра. Другой тип цифрового дефекта, помимо

шума, хоть и нечасто встречающийся в современных датчиках, – локальное пропадание полезного сигнала спектра. Этот тип дефекта может иметь различную протяженность, поэтому ширина такого дефекта, в случае его наличия в спектре, также включена в набор входных параметров нейронной сети.

Для обучения сети было сгенерировано 2000 спектров с различными соотношениями сигнал/шум, центральной частотой, а также положением и протяженностью цифрового дефекта. Соотношение объема данных при обучении и тестировании сети составило 1500:500 соответственно. Проектирование и верификация работоспособности сети проводились на задаче распознавания рукописного набора цифр базы данных MNIST. Точность распознавания при этом составила более 97 %, что соответствует результатам, представленным в литературе [19].

Путем последовательного перебора различных параметров нейронной сети было обнаружено, что наилучший результат определения максимума бриллюэновского спектра получается при использовании четырехслойного персептрона с двумя скрытыми слоями по 50 и 25 нейронов соответственно. В качестве функции активации нейронов использовалась сигмоидальная функция [20].

Конечная структура сети представлена на рис. 1. Сеть состоит из пяти входных нейронов, двух скрытых слоев и одного выходного нейрона.

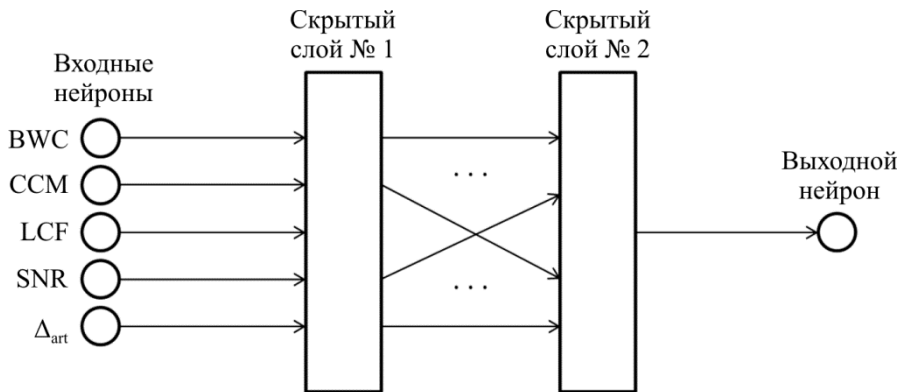


Рис. 1. Структура нейронной сети: BWC – результат метода обратной корреляции; CCM – классического метода кросс-корреляции; LCF – аппроксимация лоренцевой функцией; SNR – отношение сигнал/шум;  $\Delta_{\text{арт}}$  – ширина области дефекта

Обучение сети производилось на сгенерированных спектрах по принципу обратного распространения ошибки. При этом способе обучения выходное значение сети сравнивается с правильным значением, а ошибка, представляющая собой разницу этих значений, возвращается через сеть. При этом корректируются значения весов связей между нейронами для последующего уменьшения ошибки.

В связи с тем, что входные параметры сети имеют различные порядки и единицы измерения, каждый параметр был индивидуально нормализован в пределах от 0 до 1.

На рис. 2 представлен график динамики ошибки сети в процессе обучения.

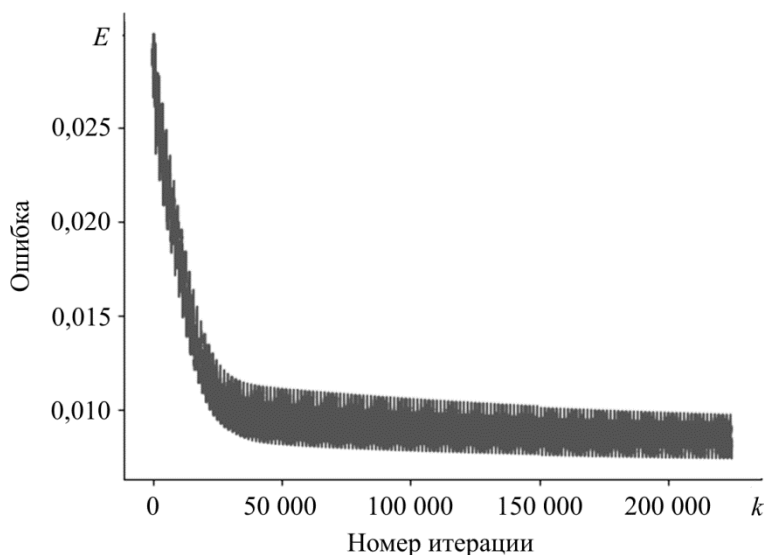


Рис. 2. Динамика изменения ошибки определения максимума бриллюэновского спектра при помощи нейронной сети

Оценка точности методов производилась путем расчета стандартного отклонения ошибки определения максимума спектра для каждого метода. Сравнительные характеристики методов расчета максимума для смоделированных спектров приведены в таблице.

В результате применения такого подхода удалось добиться снижения ошибки определения максимума бриллюэновского спектра на величину порядка 10 %. Этот результат можно считать существенным, принимая во внимание то, что к спектру уже были применены совре-

менные методы поиска максимума, для которых дальнейшее увеличение точности повлекло значительное увеличение необходимой вычислительной мощности системы.

### Сравнение результатов расчета

| № п/п | Метод                       | Стандартное отклонение ошибки |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1     | BWC                         | 0,0072                        |
| 2     | CCM                         | 0,0071                        |
| 3     | LCF                         | 0,0086                        |
| 4     | Комбинированный (нейросеть) | 0,0064                        |

Представленная работа демонстрирует потенциальную возможность увеличения точности классических распределенных систем бриллюэновского мониторинга без использования сложных алгоритмов обработки, а также без усложнения аппаратной части сенсора. Это открывает возможности для использования типового аттестованного оборудования для получения более точных сведений о состоянии волоконной линии. Помимо этого, такой принцип обработки позволит удешевить создание лабораторных систем, поскольку становится возможным использование менее дорогих фотоприемных устройств и вычислительной техники.

### Благодарность

*Работа выполнена как часть Государственного задания № АААА-А19119042590085-2.*

### Список литературы

1. Horiguchi T., Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, iss. 8. – P. 1170–1176. DOI: 10.1109/50.32378
2. Behavior of femtosecond laser-induced eccentric fiber bragg gratings at very high temperatures / H. Chikh-Bled, K. Chah, Álvaro González-Vila, B. Lasri, C. Caucheteur // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, iss. 17. – P. 4048–4051. DOI: 10.1364/OL.41.004048
3. Fast and stable gratings inscription in pofs made of different materials with pulsed 248 nm krf laser / C.A.F. Marques, R. Min, A.L. Junior, P. Antunes,

A. Fasano, G. Woyessa, K. Nielsen, H.K. Rasmussen, B. Ortega, O. Bang // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, iss. 2 – P. 2013–2022. DOI: 10.1364/OE.26.002013

4. Compensation method for temperature cross-sensitivity in transverse force applications with FBG sensors in POFs / A.G. Leal-Junior, A. Theodosiou, C. Marques, M.J. Pontes, K. Kalli, A. Frizera // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Vol. 36, iss. 17 – P. 3660–3665. DOI: 10.1109/JLT.2018.2848704

5. Galindez-Jamioy C.A., López-Higuera J.M. Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications // *Journal of Sensors*. – 2012. – Vol. 2012. – Art. 204121. DOI: 10.1155/2012/204121

6. Zan M.S.D.B., Horiguchi T. A dual golay complementary pair of sequences for improving the performance of phase-shift pulse BOTDA fiber sensor // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30, iss. 21. – P. 3338–3356. DOI: 10.1109/JLT.2012.2215578

7. Bao X., Chen L., Recent progress in distributed fiber optic sensors // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12, iss. 12. – P. 8601–8639. DOI: 10.3390/s120708601

8. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15, iss. 18. – P. 1038. DOI: 10.1364/OL.15.001038

9. Nikles M., Thevenaz L., Robert P.A. Measurement of the distributed-Brillouin gain spectrum in optical fibers by using a single laser source // *OSA Technical Digest Series (Optical Society of America) [Conference on Optical Fiber Communication, San Jose, California United States, 20 February 1994]*. – 1994. – Vol. 4. – Art. WF1. DOI: 10.1364/OFC.1994.WF1

10. Soto M.A., Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, iss. 25. – P. 31347. DOI: 10.1364/OE.21.031347

11. Li C., Li Y. Fitting of Brillouin spectrum based on LabVIEW // *2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 24–26 September 2009, Beijing, China*. – IEEE, 2009. – P. 1–4. DOI: 10.1109/WICOM.2009.5303692

12. Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, iss. 21. – P. 4275. DOI: 10.1364/OL.36.004275

13. Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. A detailed evaluation of the correlation-based method used for estimation of the Brillouin frequency shift in BOTDA sensors // *IEEE Sensors Journal*. – 2013. – Vol. 13, iss. 12. – P. 4589–4598. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2271254

14. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers*. – 2020. – Vol. 8, iss. 9. – P. 60. DOI: 10.3390/fib8090060



15. Сравнительный анализ точности определения сдвига бриллюэновской частоты в экстремально зашумленных спектрах различными корреляционными методами / А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов, Ф.Л. Барков, В.П. Первадчук // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 2. – С. 84–89. DOI: 10.31857/S0032816221050062

16. Temperature extraction in Brillouin optical time-domain analysis sensors using principal component analysis based pattern recognition / A.K. Azad, F.N. Khan, W.H. Alarashi, N. Guo, A.P.T. Lau, C. Lu // Optics Express. – 2017. – Vol. 25, iss. 14. – P. 16534–16549. DOI: 10.1364/OE.25.016531

17. Deep neural networks assisted BOTDA for simultaneous temperature and strain measurement with enhanced accuracy / B. Wang, L. Wang, N. Guo, Z. Zhao, C. Yu, C. Lu // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, iss. 3. – P. 2530. DOI: 10.1364/OE.27.002530

18. Support vector machine based differential pulse-width pair Brillouin optical time domain analyzer / H. Wu, L. Wang, Z. Zhao, C. Shu, C. Lu // IEEE Photonics Journal. – 2018. – Vol. 10, iss. 4. – P. 1–11. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2858235

19. Тарик Р. Создаем нейронную сеть: пер. с англ. – СПб.: Альфа-книга, 2017. – 272 с.

20. Cybenko G. Approximation by superpositions of sigmoidal functions // Mathematics of Control Signals and Systems. – 1989. – Vol. 2, no. 4. – P. 303–314.

## References

1. Horiguchi T., Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, vol. 7, iss. 8, pp. 1170-1176. DOI: 10.1109/50.32378

2. Chikh-Bled H., Chah K., Álvaro González-Vila, B. Lasri, C. Caucheteur. Behavior of femtosecond laser-induced eccentric fiber bragg gratings at very high temperatures. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, iss. 17, pp. 4048-4051. DOI: 10.1364/OL.41.004048

3. Marques C.A.F., Min R., Junior A.L., Antunes P., Fasano A., Woyessa G., Nielsen K., Rasmussen H.K., Ortega B., Bang O. Fast and stable gratings inscription in pofs made of different materials with pulsed 248 nm krf laser. *Optics Express*, 2018, vol. 26, Iss. 2, pp. 2013-2022. DOI: 10.1364/OE.26.002013

4. Leal-Junior A.G., Theodosiou A., Marques C., Pontes M.J., Kalli K., Frizzera A. Compensation Method for Temperature Cross-Sensitivity in Transverse Force Applications with FBG Sensors in POFs. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, vol. 36, iss. 17, pp. 3660-3665. DOI: 10.1109/JLT.2018.2848704

5. Galindez-Jamioy C.A., López-Higuera J.M. Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications. *Journal of Sensors*, 2012, vol. 2012, art. 204121. DOI: 10.1155/2012/204121

6. Zan M.S.D.B., Horiguchi T. A dual golay complementary pair of sequences for improving the performance of phase-shift pulse BOTDA fiber sensor. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, iss. 21, pp. 3338-3356. DOI: 10.1109/JLT.2012.2215578
7. Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 2012, vol.12, iss. 12, pp. 8601-8639. DOI: 10.3390/s120708601
8. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. *Optics Letters*, 1990, vol. 15, iss. 18, pp. 1038. DOI: 10.1364/OL.15.001038
9. Nikles M., Thevenaz L., Robert P.A. Measurement of the distributed-Brillouin gain spectrum in optical fibers by using a single laser source // OSA Technical Digest Series (Optical Society of America), 1994, vol. 4, art. WF1. DOI: 10.1364/OFC.1994.WF1
10. Soto M.A., Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors. *Optics Express*, 2013, vol. 21, iss. 25, p. 31347. DOI: 10.1364/OE.21.031347
11. Li C., Li Y. Fitting of Brillouin Spectrum Based on LabVIEW. *2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE, 2009. – P. 1-4. DOI: 10.1109/WICOM.2009.5303692
12. Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, iss. 21, p. 4275. DOI: 10.1364/OL.36.004275
13. Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. A detailed evaluation of the correlation-based method used for estimation of the Brillouin frequency shift in BOTDA sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, iss. 12, pp. 4589-4598. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2271254
14. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. A Novel Method of Spectra Processing for Brillouin Optical Time Domain Reflectometry. *Fibers*, 2020, vol. 8, iss. 9, p. 60. DOI: 10.3390/fib8090060
15. Krivosheev A.I., Konstantinov Yu.A., Barkov F.L., Pervadchuk V.P. Comparison of the accuracy of extremely noised spectra Brillouin frequency shift detection by different correlation methods. *Instruments and experimental techniques*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 84-89. DOI: 10.31857/S0032816221050062
16. Azad A.K., Khan F.N., Alarashi W.H., Guo N., Lau A.P.T., Lu C. Temperature extraction in Brillouin optical time-domain analysis sensors using principal component analysis based pattern recognition. *Optics Express*, 2017, vol. 25, iss. 14, pp. 16534-16549. DOI: 10.1364/OE.25.016531
17. Wang B., Wang L., Guo N., Zhao Z., Yu C., Lu C. Deep neural networks assisted BOTDA for simultaneous temperature and strain measurement with enhanced accuracy. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 3, p. 2530. DOI: 10.1364/OE.27.002530

18. Wu H., Wang L., Zhao Z., Shu C., Lu C. Support vector machine based differential pulse-width pair Brillouin optical time domain analyzer. *IEEE Photonics Journal*, 2018, vol. 10, iss. 4, pp. 1-11. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2858235

19. Tariq Rashid. Make your own neural network. Createspace Independent Publishing Platform, 2016. 224 p.

20. Cybenko G. Approximation by superpositions of sigmoidal functions. *Mathematics of Control Signals and Systems*. 1989. vol. 2, no. 4, pp. 303-314.

Статья получена: 15.07.2021

Статья принята: 16.09.2021

### Сведения об авторах

**Кривошеев Антон Иванович** (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник, аспирант, лаборатория фотоники, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (614990, Пермь, ул. Ленина, 13а, e-mail: antokri@ya.ru).

**Константинов Юрий Александрович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория фотоники, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (614990, Пермь, ул. Ленина, 13а, e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru).

**Первадчук Владимир Павлович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

**Барков Федор Леонидович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник, врио заведующего лабораторией фотоники, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (614990, Пермь, ул. Ленина, 13а, e-mail: theodor1@mail.ru).

### About the authors

**Anton I. Krivosheev** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. Student, Junior Researcher, Laboratory of Photonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (13A, Lenina st., Perm, 614990, e-mail: antokri@ya.ru).

**Yury A. Konstantinov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, Laboratory of Photonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (13A, Lenina st., Perm, 614990, e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru).

**Vladimir P. Pervadchuk** (Perm, Russian Federation) – Dr. Habil. in Engineering, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Perm Nation-

al Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

**Fedor L. Barkov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, Interim Head of the Laboratory, Laboratory of Photonics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (13A, Lenina st., Perm, 614990, e-mail: theodor1@mail.ru).

**Библиографическое описание статьи согласно  
ГОСТ Р 7.0.100–2018:**

Комбинированный нейросетевой метод определения максимума бриллюэновского спектра в распределенных волоконно-оптических датчиках / А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, Ф.Л. Барков. – текст : непосредственный. – DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.05 // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 3. – С. 95–106.

**Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:**

Комбинированный нейросетевой метод определения максимума бриллюэновского спектра в распределенных волоконно-оптических датчиках / А.И. Кривошеев, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, Ф.Л. Барков // Прикладная математика и вопросы управления. – 2021. – № 3. – С. 95–106. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.05

**Цитирование статьи в references и международных изданиях**

**Cite this article as:**

Krivosheev A.I., Konstantinov Yu.A., V.P. Pervadchuk, F.L. Barkov Combined neural network method for determining the Brillouin spectrum maximum in distributed fiber-optic sensors. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2021, no. 3, pp. 95–106. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.3.05