

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ  
И СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТА**

А. О. ЗЕНЕВИЧ, С. В. ЖДАНОВИЧ, Е. В. НОВИКОВ,  
Т. А. МАТКОВСКАЯ\*, Т. Г. КОВАЛЕНКО

*Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,  
\*tandem7m@gmail.com*

**Аннотация.** В настоящее время основной средой передачи данных стали волоконно-оптические линии связи, а для мониторинга состояния различных объектов все чаще начинают использоваться волоконно-оптические датчики, чувствительным элементом которых являются участки оптического волокна с макроизгибами. Показана возможность совмещения на базе одного волокна волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта. При этом для передачи информации предложено использовать длину волны 1310 нм, а для системы мониторинга состояния объекта — 1490, 1550 и 1625 нм. Предложена экспериментальная установка, обеспечивающая возможность одновременного использования оптического волокна для передачи данных и съема информации с системы мониторинга. Установлены параметры макроизгибов оптического волокна, которые можно использовать в датчиках системы мониторинга. Показано, что макроизгибы с такими параметрами практически не вносят дополнительного ослабления оптического излучения на длине волны 1310 нм. Определено максимальное количество датчиков, которые могут использоваться в системе мониторинга при таких параметрах макроизгибов. Результаты исследований могут найти применение при создании телекоммуникационных систем, совмещенных с системами мониторинга состояния объектов.

**Ключевые слова:** *волоконно-оптическая линия связи, системы мониторинга состояния объекта, макроизгиб, ослабление мощности оптического излучения*

**Ссылка для цитирования:** *Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 406—412. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412.*

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF COMBINING A FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE  
AND AN OBJECT MONITORING SYSTEM**

A. O. Zenevich, S. V. Zhdanovich, E. V. Novikov,  
T. A. Matkovskaia\*, T. G. Kovalenko

*Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus  
tandem7m@gmail.com*

**Abstract.** Currently, fiber-optic communication lines have become the main medium for data transmission, and fiber-optic sensors are increasingly being used to monitor the state of various objects, the sensitive element of which are sections of optical fiber with macro-bends. The possibility of combining a fiber-optic communication line and an object condition monitoring system on the basis of a single fiber is shown. It is proposed to use a wavelength of 1310 nm for transmitting information, and 1490, 1550 and 1625 nm for monitoring the state of the object. An experimental setup is proposed, which provides the possibility of simultaneous use of optical fiber for data transmission and information retrieval from the monitoring system. Parameters of the optical fiber macro bends that can be used in the sensors of the monitoring system are obtained. It is shown that macro-bends with such parameters practically do not contribute to additional attenuation of optical radiation at a wavelength of 1310 nm. The maximum number of sensors that can be used in

the monitoring system with such macro-bending parameters is determined. The results of the research can be used in the creation of telecommunication systems combined with systems for monitoring the condition of objects.

**Keywords:** fiber-optic communication line, systems for object state monitoring, macro-bending, attenuation of optical radiation power

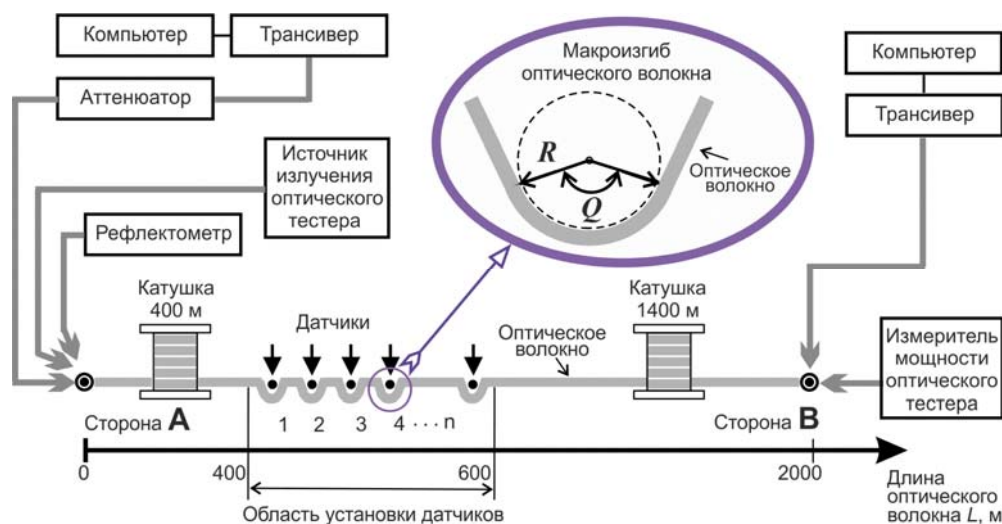
**For citation:** Zenevich A.O., Zhdanovich S. V., Novikov E. V., Matkovskaia T. A., Kovalenko T. G. Investigation of the possibility of combining a fiber-optic communication line and an object monitoring system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 406—412 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412.

**Введение.** В настоящее время основной средой передачи данных служат волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [1—4]. Для мониторинга состояния различных объектов все чаще начинают использоваться волоконно-оптические датчики [5—7]. Такие датчики имеют ряд преимуществ перед традиционными электрическими, в частности, электробезопасность и невосприимчивость к электромагнитным воздействиям. Кроме того, важно отметить принципиальную возможность реализации подобных датчиков на базе оптических волокон, по которым осуществляется передача данных.

Для создания волоконно-оптических датчиков можно использовать промышленно выпускаемые оптические волокна, которые производятся в достаточно широком ассортименте [8]. В связи с этим необходим анализ условий, при выполнении которых возможно совмещение волоконно-оптических линий связи и систем мониторинга состояния объектов, построенных на основе волоконно-оптических датчиков. Такое совмещение позволит значительно снизить себестоимость системы мониторинга.

На сегодняшний день возможность такого совмещения не изучена. Поэтому целью представленных в настоящей статье исследований является установление возможности обеспечения совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта и определение необходимых условий.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** Для проведения исследований создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.



Установка содержит волоконно-оптическую линию связи протяженностью 2 км, построенную на базе одномодового оптического волокна G655. Этот тип волокна достаточно восприимчив к появлению макроизгибов [9]. Под восприимчивостью понимается зависимость величины ослабления мощности оптического излучения в волокне от показанных на рис. 1 параметров макроизгиба: радиуса  $R$  и длины дуги  $L_d = QR$  ( $Q$  — центральный угол дуги окружности макроизгиба). Область размещения датчиков находится в 400—600 м от стороны А

оптического волокна линии связи (см. рис. 1). В качестве чувствительного элемента датчиков использовалось само оптическое волокно.

Принцип работы датчиков основан на формировании макроизгиба оптического волокна при внешнем воздействии на датчик. Конструкция датчиков позволяет пропорционально величине воздействия изменять значение  $R$  или  $Q$ , как это показано в работе [10]. Появление макроизгиба приводит к ослаблению мощности оптического излучения в волокне. По значению вносимого макроизгибом ослабления мощности излучения можно определять величину воздействия.

Ослабление мощности оптического излучения, вносимое каждым датчиком в отдельности, измерялось поверенным и калиброванным рефлектометром FX300, подключаемым к оптическому волокну, как это показано на рис. 1. Исследования осуществлялись на длинах волн 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, которые соответствуют окнам прозрачности одномодового оптического волокна [11, 12]. Суммарное ослабление мощности, вносимое макроизгибами оптического волокна, измерялось поверенным и калиброванным оптическим тестером ОТ-3-1. При этом источник оптического излучения подключался с одной стороны оптического волокна, а измеритель мощности — с другой (см. рис. 1).

Для исследования параметров передачи данных в линии связи к оптическому волокну со стороны А и со стороны В с помощью трансиверов подключались два компьютера, имитирующие оптоволоконную систему передачи данных по технологии GigabitEthernet (1000BASE-LX) на длине волны 1310 нм. Обмен данными между компьютерами осуществлялся отдельными блоками большого размера. Установленное на этих компьютерах программное обеспечение позволяло управлять размером блоков и определять скорость передачи данных. Для ее измерения при различных значениях ослабления мощности оптического излучения в линии связи в экспериментальной установке использовались калиброванные аттенюаторы с фиксированной величиной затухания, которые включались между трансивером и линией связи.

Измерения проводились в соответствии с требованиями, определяемыми ГОСТ ISO/IEC 17025-2019\*. При этом контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 ГПа.

**Результаты исследований и их обсуждение.** При совмещении волоконно-оптических линий связи и систем мониторинга состояния объектов необходимо определить влияние на скорость передачи данных по линии связи величины ослабления мощности оптического излучения, которое вносят датчики системы мониторинга. На рис. 2 представлена зависимость скорости передачи данных  $S$  от величины ослабления оптического излучения  $D$  для длины волны 1310 нм (кривая 1). Как и следовало ожидать, увеличение ослабления излучения приводило к снижению скорости передачи данных, а затем к полному прекращению передачи.

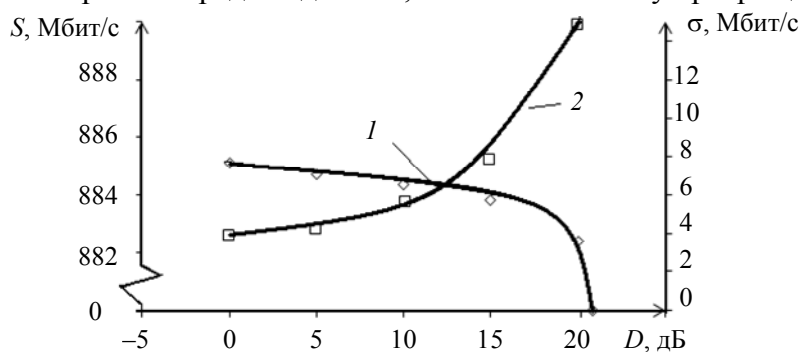


Рис. 2

\* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 „Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий“.

На рис. 2 также представлена зависимость среднеквадратичного отклонения скорости передачи информации  $\sigma$  (кривая 2) от ослабления излучения. При повышении  $D$  наблюдается возрастание  $\sigma$ , что связано с увеличением числа ошибок регистрации. При  $D > 20$  дБ передача данных полностью прекращается. Таким образом, ослабление мощности оптического излучения, которое вносят датчики системы мониторинга в линию связи, не должно превышать 20 дБ. Необходимо отметить, что при введении ослабления мощности оптического излучения  $D < 20$  дБ зарегистрированное снижение скорости передачи данных по линии связи было соизмеримо с погрешностью измерения скорости передачи (см. рис. 2). Поэтому можно утверждать, что такое ослабление мощности оптического излучения незначительно влияет на скорость передачи данных.

Для определения параметров макроизгибов, которые можно использовать в датчиках системы мониторинга, совмещенной с линией связи, необходимо знать зависимость величины ослабления  $D$ , вносимого макроизгибом, от его радиуса  $R$  при разных значениях центрального угла дуги окружности  $Q$ . Поэтому получены зависимости величины ослабления мощности оптического излучения  $D$ , вносимого макроизгибами датчиков, от радиуса макроизгибов оптического волокна при постоянном значении  $Q$ . Эти зависимости представлены на рис. 3 для макроизгибов с углами  $Q = \pi/2$  (кривые 1—4) и  $\pi$  (1'—4') при длине волны: 1, 1' — 1310; 2, 2' — 1490; 3, 3' — 1550; 4, 4' — 1625 нм.

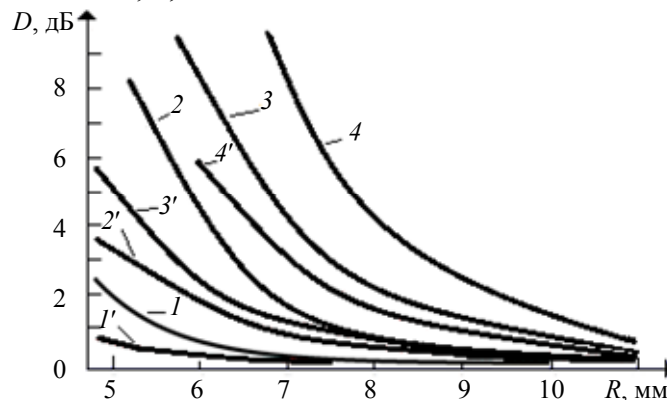


Рис. 3

Зависимости показывают, что макроизгибы одного и того же радиуса при постоянном значении  $Q$  характеризуются различными значениями  $D$  на разных длинах волн оптического излучения. При этом наибольшее ослабление мощности оптического излучения наблюдается при длине волны оптического излучения 1625 нм, а наименьшее — при 1310 нм вне зависимости от угла  $Q$ . Так, для радиуса макроизгиба 10 мм и  $Q = \pi$  ослабление мощности оптического излучения на длине волны 1625 нм составляет 1,5 дБ, а на 1310 нм — менее 0,1 дБ. При этом же радиусе макроизгиба и  $Q = \pi/2$  на длине волны 1625 нм  $D = 0,8$  дБ, а на длине волны 1310 нм ослаблением мощности оптического излучения в волокне можно пренебречь. Эффект связан с тем, что в изогнутой части оптического волокна центр модового пятна смещается относительно оси волокна на величину, зависящую от радиуса макроизгиба. В месте перехода прямой части волокна в изогнутую происходит смещение модового пятна, и только часть мощности передается в сердцевину изогнутой части. Другая часть этой мощности переходит в оболочку оптического волокна и поглощается, причем величина поглощаемой мощности зависит от диаметра модового пятна, который возрастает с увеличением длины волны оптического излучения. Чем сильнее изогнуто волокно и больше длина волны оптического излучения, тем большая часть мощности оптического излучения переходит в оболочку и теряется.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что существует возможность подобрать такие радиус и угол, при которых макроизгиб не будет существенно ослаблять мощность

оптического излучения на одной длине волны, а на другой длине величина ослабления будет достаточной для обеспечения функционирования датчика.

Экспериментальным путем определены параметры четырех макроизгибов оптического волокна, такие, чтобы каждый из макроизгибов начинал вносить заметное ослабление мощности оптического излучения с определенной длины волны. Параметры подобранных макроизгибов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры макроизгибов оптического волокна		
Номер макроизгиба	$R$ , мм	$Q$ , рад
1	6	$2/3\pi$
2	8	$\pi/2$
3	10	$3/5\pi$
4	13	$7/8\pi$

Эти макроизгибы были созданы в оптическом волокне на расстоянии 30 м друг от друга. На рис. 4 представлены рефлектограммы участка волокна, на котором располагались макроизгибы, для различных длин волн (цифры 1—4 соответствуют номеру макроизгиба). Как видно из рис. 4, для длины волны 1310 нм наблюдается только один макроизгиб. На рефлектограмме для 1490 нм видны два макроизгиба, а для 1550 нм отображаются три макроизгиба. Для длины волны 1625 нм на рефлектограмме видны все четыре макроизгиба.

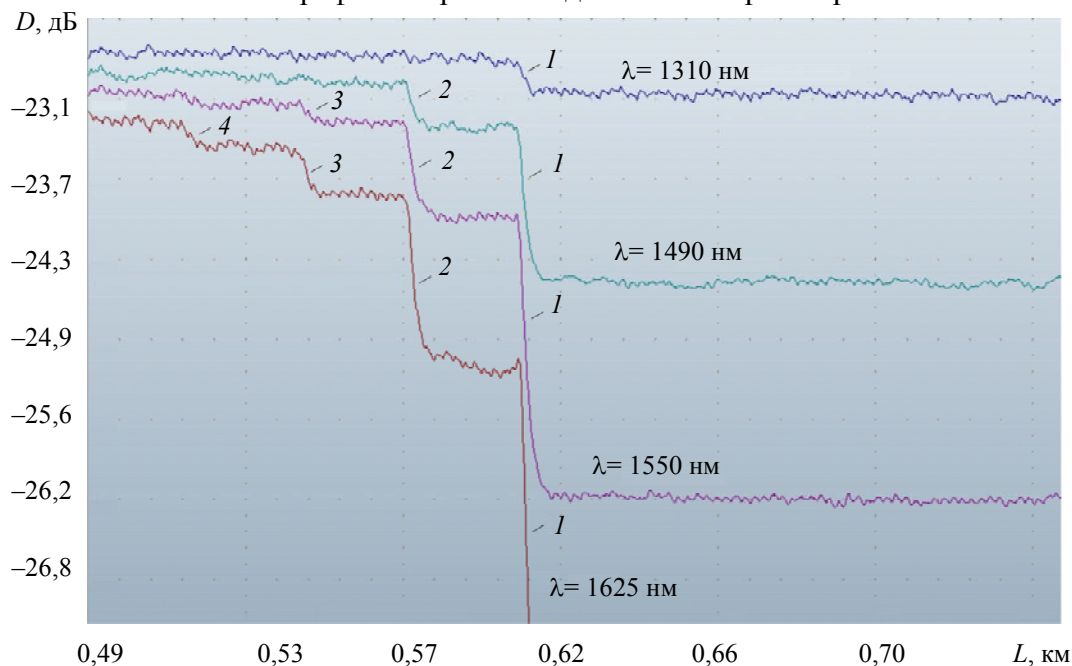


Рис. 4

Таким образом, при использовании макроизгибов 2—4 датчики на длине волны 1310 нм практические не ослабляют оптическое излучение.

Как было показано выше, передача данных по оптоволоконной линии может быть осуществлена, если создаваемое датчиками ослабление не превысит 20 дБ на длине волны передачи данных. Для определения количества датчиков  $N$ , которые могут быть использованы в системе мониторинга состояния объекта, необходимо учитывать также динамический диапазон рефлектометра, если последний будет использоваться в качестве регистрирующего устройства [13, 14].

Для наиболее точного определения положения датчиков на оптическом волокне при помощи рефлектометра FX300 длительность импульса зондирования выбиралась равной 3 нс; динамический диапазон рефлектометра 15 дБ.

В табл. 2 представлены значения ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибом оптического волокна и максимальное число датчиков, которое может содержать система мониторинга состояния объекта.

Отметим, что при размещении на оптическом волокне от 50 до 150 датчиков появлялось ослабление мощности оптического излучения на длине волны 1310 нм. Однако данное ослабление не превышало 3 дБ, поэтому передача информации на этой длине волны не прекращалась.

Таблица 2

Характеристики системы мониторинга состояния объекта

$\lambda$ , нм	$R$ , мм	$Q$ , рад	$D$ , дБ	$N$ , шт
1490	8	$\pi/2$	0,30	50
1550	8	$\pi/2$	0,70	21
	10	$3/5 \pi$	0,10	150
1625	8	$\pi/2$	1,20	12
	10	$3/5 \pi$	0,25	60
	13	$7/8 \pi$	0,15	100

**Заключение.** Установлена возможность совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга состояния объекта. Для передачи информации предлагается использовать длину волны 1310 нм, а для системы мониторинга состояния объекта можно рекомендовать 1490, 1550 и 1625 нм.

Экспериментальным путем определены параметры макроизгибов оптического волокна, которые позволяют создавать датчики системы мониторинга состояния объекта, не вносящие существенного ослабления оптического излучения в линии связи при передаче данных на длине волны 1310 нм.

Для определенных параметров макроизгибов рассчитано количество датчиков, которые могут быть использованы в системе мониторинга состояния объекта при условии обеспечения возможности передачи данных посредством этого оптического волокна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. NY: Wiley-Interscience, 2002.
2. Дмитриев С. А., Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
3. Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Тренз, 2002. 276 с.
4. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Тренз, 2001. 267 с.
5. Fidanboyly K., Efendioğlu H. S. Fiber optic sensors and their applications // 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09). 13—15 May 2009, Karabuk, Turkey. P. 1—6.
6. Udd E., Spillman W. B., jr. Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists. NJ: John Wiley & Sons, 2011.
7. Iniewski K., Rajan G. Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015.
8. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
9. Василевский Г. В., Зеневич А. О., Лагутик А. А., Лукашик Т. М., Новиков Е. В., Жданович С. В. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна // Веснік сувязі. 2020. № 1(159). С. 56—59.
10. Василевский Г. В., Зеневич А. О., Жданович С. В., Лукашик Т. М., Лагутик А. А. Использование макроизгиба оптоволокна в качестве основы для создания датчика массы // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 930—937.
11. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб: Лань, 2021. 268 с.
12. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2006. 320 с.

13. Листвин А. В. Рефлектометрия оптических волокон. М: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.
14. Соллер Б. Дж., Гиффорд Д. К., Вольф М. С., Фроггатт М. Э. Оптическая рефлектометрия высокого разрешения // Фотоника. 2019. Т. 13, № 5. С. 452—460.

**Сведения об авторах**

- Андрей Олегович Зеневич** — д-р. техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Сергей Вячеславович Жданович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; зав. лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Евгений Владимирович Новиков** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, Институт современных технологий связи; директор института; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Татьяна Александровна Матковская** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tandem7m@gmail.com
- Татьяна Георгиевна Коваленко** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра математики и физики; E-mail: tgkov@yandex.by

Поступила в редакцию 05.02.22; одобрена после рецензирования 03.03.22; принята к публикации 25.04.22.

**REFERENCES**

1. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*, NY, Wiley-Interscience, 2002.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskayatekhnika: sovremennoyesostoyaniyeinovyyeperspektivy* (Fiber-Optic Technology: State of the Art and New Perspectives), Moscow, 2010, 607 p. (in Russ.)
3. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. *Volokonno-opticheskiye kabeli i linii svyazi* (Fiber Optic Cables and Communication Lines), Moscow, 2002, 276 p. (in Russ.)
4. Ubaidullaev R.R. *Volokonno-opticheskiyeseiti* (Fiber Optic Networks), Moscow, 2001, 267 p. (in Russ.)
5. Fidanboyly K., Efendioğlu H.S. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, May 13–15, 2009, Karabuk, Turkey, pp. 1–6.
6. Udd E., Spillman W.B., jr. *Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists*, NJ, John Wiley & Sons, 2011.
7. Iniewski K., Rajan G. *Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications*, Boca Raton, CRC Press, 2015.
8. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
9. Vasileuski H.V., Zenevich A.O., Lagutik A.A., Lukashik T.M., Novikov E.V., Zhdanovich S.V. *Vesnik Svjazi*, 2020, no. 1(159), pp. 56–59. (in Russ.)
10. Vasileuski H.V., Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Lukashik T.M., Lagutik A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 930–937. (in Russ.)
11. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskiye seti i sistemy svyazi* (Fiber Optic Networks and Communication Systems), St. Petersburg, 2021, 268 p. (in Russ.)
12. Bailey D., Wright E. *Practical Fiber Optics*, Perth, Australia, 2003.
13. Listvin A.V. *Reflektometriya opticheskikh volokon* (Reflectometry of Optical Fibers), Moscow, 2005, 208 p. (in Russ.)
14. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. *Photonics Russia*, 2019, no. 5(13), pp. 452–460. (in Russ.)

**Data on authors**

- Andrey O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector of the Academy; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Sergey V. Zhdanovich** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications; Industry Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Evgeny V. Novikov** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Tatiana A. Matkovskaia** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tandem7m@gmail.com
- Tatiana G. Kovalenko** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Mathematics and Physics; E-mail: tgkov@yandex.by

Received 05.02.22; approved after reviewing 03.03.22; accepted for publication 25.04.22.