

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ****А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, Т. А. Матковская\*, А. В. Шваков***Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь**\* t.matkovskaia@bsac.by*

**Аннотация.** Оптические волокна являются основой систем передачи данных. Однако во время эксплуатации оптический кабель может быть поврежден, и для устранения возникших повреждений в полевых условиях необходимо знать длину волны оптического излучения в этом волокне и мощность излучения по каждой из используемых длин волн. Этим определяется актуальность разработки доступного для использования в полевых условиях, без применения сложного и дорогостоящего оборудования, метода регистрации длины волны излучения на выходе оптического волокна. Предложен метод определения длины волны оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну, основанный на использовании макроизгиба последнего. Разработана экспериментальная установка для реализации метода. Показано, что такой метод может быть использован как для одномодового, так и для многомодового оптического волокна. Установлено, что для всех исследуемых оптических волокон отклонение определенных при помощи метода значений мощности от реальных не превышает 12,5 %. Результаты работы могут быть использованы в системах волоконно-оптической связи для определения длины волны и мощности излучения, распространяющегося по оптическому кабелю.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, макроизгиб, длина волны, мощность оптического излучения

**Ссылка для цитирования:** Зеневич А. О., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Шваков А. В. Определение длины волны излучения в оптическом волокне // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 689–696. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-689-696.

**DETERMINING THE WAVELENGTH OF RADIATION IN AN OPTICAL FIBER****A. O. Zenevich, E. V. Novikov, T. A. Matkovskaia\*, A. V. Shvakov***Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus**\* t.matkovskaia@bsac.by*

**Abstract.** Optical fibers are the basis of data transmission systems. However, during operation, the optical cable may be damaged, and to eliminate the damage that has occurred in the field, it is necessary to know the wavelength of optical radiation in this fiber and the radiation power for each of the wavelengths used. This determines the relevance of developing a method for recording the wavelength of radiation at the output of an optical fiber that is accessible for use in field conditions, without the use of complex and expensive equipment. A method for determining the wavelength of optical radiation propagating through an optical fiber based on the use of the fiber macrobending is proposed. An experimental setup for implementing the method is developed. It is shown that this method can be used for both single-mode and multimode optical fibers. It is established that for all the studied optical fibers, the deviation of the power values determined using the method from the real ones does not exceed 12.5 %. The results of the work can be used in fiber-optic communication systems to determine the wavelength and power of radiation propagating through an optical cable.

**Keywords:** optical fiber, macrobending, wavelength, optical radiation power

**For citation:** Zenevich A. O., Novikov E. V., Matkovskaia T. A., Shvakov A. V. Determining the wavelength of radiation in an optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 8. P. 689–696 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-689-696.

**Введение.** В настоящее время оптические волокна находят широкое применение для передачи данных [1–4]. Во время эксплуатации оптических волокон возникают повреждения [5–9], для их устранения необходимо знать не только тип оптического волокна, по которому распространяется излучение, но и длину волны и мощность оптического излучения в этом волокне. Для определения длины волны излучения в оптическом волокне можно использовать оптические анализаторы спектра [10, 11]. Однако применение таких анализаторов в полевых условиях достаточно затруднительно. Кроме того, оптические анализаторы спектра являются дорогостоящими и сложными приборами. В связи с этим необходим метод регистрации длины волны и мощности оптического излучения на выходе оптического волокна, который мог бы применяться в полевых условиях на достаточно простом и недорогом оборудовании. Разработка такого метода, использующего влияние геометрических параметров макроизгиба на мощность излучения, распространяющегося по оптическому волокну, явилась целью настоящей статьи.

**Сущность метода.** Метод измерения мощности оптического излучения для каждой из длин волн, на которых ведется передача данных в оптическом волокне, заключается в следующем. В отдельности для каждой длины волны такого излучения определяется коэффициент уменьшения фототока фотоприемника при заданном радиусе макроизгиба оптического волокна. С этой целью устанавливается определенное значение мощности источника оптического излучения на заданной длине волны, затем это излучение по оптическому волокну направляется на фотоприемник и находится величина фототока. После этого в оптическом волокне формируется макроизгиб некоторого радиуса и определяется фототок фотоприемника. Затем вычисляется отношение фототоков при наличии и отсутствии макроизгиба этого волокна. Такие измерения и вычисления выполняются для всех длин волн.

В одномодовом оптическом волокне передача данных осуществляется на длинах волн, соответствующих „окнам прозрачности“ этого волокна:  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм [12]. Поэтому для одномодового оптического волокна система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} I_{1\phi} = I_{\phi 1} + I_{\phi 2} + I_{\phi 3} + I_{\phi 4}, \\ I_{2\phi} = k_{11}I_{\phi 1} + k_{12}I_{\phi 2} + k_{13}I_{\phi 3} + k_{14}I_{\phi 4}, \\ I_{3\phi} = k_{21}I_{\phi 1} + k_{22}I_{\phi 2} + k_{23}I_{\phi 3} + k_{24}I_{\phi 4}, \\ I_{4\phi} = k_{31}I_{\phi 1} + k_{32}I_{\phi 2} + k_{33}I_{\phi 3} + k_{34}I_{\phi 4}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}$  и  $I_{\phi 4}$  — фототоки, возникающие в фотоприемнике в отсутствие макроизгиба оптического волокна под воздействием оптического излучения с  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм соответственно;  $I_{1\phi}$  — фототок, возникающий в фотоприемнике при воздействии на него смесью оптических излучений на  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм, в отсутствие макроизгиба оптического волокна;  $I_{2\phi}, I_{3\phi}, I_{4\phi}$  — фототоки, возникающие в фотоприемнике при воздействии на него смесью оптических излучений на  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм при наличии в оптическом волокне макроизгибов с радиусом  $R_1, R_2, R_3$  соответственно;  $k_{11}, k_{12}, k_{13}$  и  $k_{14}$  — коэффициенты уменьшения фототока фотоприемника для оптического излучения с  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм соответственно и при наличии в волокне макроизгиба с радиусом  $R_1$ ;  $k_{21}, k_{22}, k_{23}$  и  $k_{24}$  — коэффициенты уменьшения фототока фотоприемника для оптического излучения с  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм соответственно и при наличии в волокне макроизгиба с  $R_2$ ;  $k_{31}, k_{32}, k_{33}$  и  $k_{34}$  — коэффициенты уменьшения фототока фотоприемника для оптического излучения с  $\lambda = 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм соответственно и при наличии в волокне макроизгиба с  $R_3$ .

Таким образом, параметры  $I_{2\phi}, I_{3\phi}$  и  $I_{4\phi}$  соответствуют величине фототоков фотоприемника при наличии макроизгибов одномодового оптического волокна с  $R_1, R_2, R_3$  соответственно. Значение  $I_{1\phi}$  определялось в отсутствие макроизгиба оптического волокна. Полученные значения фототоков  $I_{1\phi}, I_{2\phi}, I_{3\phi}, I_{4\phi}$  и коэффициентов уменьшения фототока подставляются в систему уравнений (1). Затем решается система уравнений (1) и находится величина фототоков  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}, I_{\phi 4}$ .

В многомодовом оптическом волокне передача данных осуществляется на длинах волн, соответствующих „окнам прозрачности“ этого волокна: 850 и 1300 нм [13]. Поэтому для многомодового оптического волокна система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} I_{1\phi} = I_{\phi 1} + I_{\phi 2}, \\ I_{2\phi} = k_{11}I_{\phi 1} + k_{12}I_{\phi 2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $I_{\phi 1}$  и  $I_{\phi 2}$  — фототоки, возникающие в фотоприемнике под воздействием мощностей оптического излучения с  $\lambda = 850$  и 1300 нм соответственно в отсутствие макроизгиба оптического волокна;  $I_{1\phi}$  — фототок, возникающий в фотоприемнике при воздействии на него смесью оптических излучений, содержащих  $\lambda = 850$  и 1300 нм в отсутствие макроизгиба оптического волокна;  $I_{2\phi}$  — фототок, возникающий в фотоприемнике при воздействии на него смесью оптических излучений с  $\lambda = 850$  и 1300 нм при наличии в оптическом волокне макроизгибов с  $R_1$ ;  $k_{11}$ ,  $k_{12}$  — коэффициенты уменьшения фототока фотоприемника для оптического излучения с  $\lambda = 850$  и 1300 нм соответственно и при наличии в волокне макроизгиба с  $R_1$ .

Таким образом, величина фототока фотоприемника  $I_{2\phi}$  измеряется при наличии макроизгиба многомодового оптического волокна с радиусом  $R_1$ . Значение  $I_{1\phi}$  определяется в отсутствие макроизгиба этого волокна. Полученные значения фототоков  $I_{1\phi}$ ,  $I_{2\phi}$  и коэффициентов уменьшения фототока подставляются в систему уравнений (2), откуда и находятся величины фототоков  $I_{\phi 1}$ ,  $I_{\phi 2}$ .

Чтобы найти мощность оптического излучения для каждого значения  $\lambda$ , необходимо полученное значение фототока для этой длины волны разделить на чувствительность фотоприемника на данной длине волны.

Таким образом, получив значения мощности излучения на каждой из возможных длин волн, можно сделать вывод о наличии в оптическом волокне излучения соответствующей длины волны и соотношении мощностей этих излучений.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Для реализации предложенного метода и измерения характеристик макроизгибов оптического волокна различных марок была создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1. В состав установки входят следующие узлы и блоки: И1, И2, И3, И4, И5 и И6 — источники оптического излучения с длинами волн 850, 1300, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм соответственно; Б1 — блок управления источниками излучения; Б2 — блок управления формирователем макроизгиба; П1— П6 — патч-корды; ОМ — оптический мультиплексор; Ф — формирователь макроизгиба; ОВ — оптическое волокно; ФП — фотоприемник; А — амперметр.

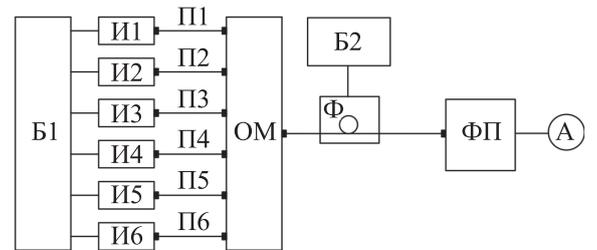


Рис. 1

В качестве источников излучения использовались полупроводниковые лазеры с  $\lambda = 850$ , 1300, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм (рис. 1). При этом оптическое излучение с  $\lambda = 850$  и 1300 нм применяется для исследования характеристик многомодового оптического волокна, а с  $\lambda = 1310$ , 1490, 1550 и 1625 нм — одномодового.

Мощность всех источников оптического излучения изменяется в диапазоне от 0,01 до 5 мВт с использованием Б1.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом. Оптическое излучение от источников при помощи патч-кордов подается на оптический мультиплексор, имеющий шесть входов и один выход. ОМ соединяется при помощи оптического волокна с фотоприемником. Это позволяет оптическому излучению с выхода мультиплексора поступать на фотоприемник.

На ОВ формирователем создается макроизгиб в виде одного витка волокна. При помощи блока формирователя макроизгиба можно изменить радиус созданного макроизгиба в пределах

2,5–6,5 мм. Этот диапазон подобран таким образом, чтобы, с одной стороны, не наступил излом волокна, а с другой стороны, потеря мощности излучения на витке была измеримой.

Для измерения электрического тока фотоприемника используется амперметр.

При отключенных источниках излучения амперметром измеряется величина темнового электрического тока  $I_T$ , протекающего через ФП. При поступлении оптического излучения хотя бы от одного источника излучения возникает электрический ток  $I$ . Величина фототока вычисляется как разность между  $I$  и  $I_T$ .

В экспериментальной установке для регистрации оптического излучения, распространяющегося в одномодовых и многомодовых оптических волокнах, использовался фотоприемник на основе InGaAs PIN-фотодиод серии C30641GH.

Значения фототоков и коэффициентов уменьшения фототока для каждой из исследуемых длин волн измерялись при подключении к оптическому мультиплексору только одного источника оптического излучения. По величине фототока, полученной без макроизгиба оптического волокна, определялась мощность оптического излучения, соответствующая этой длине волны. При этом полученное значение фототока делится на чувствительность фотоприемника для этой длины волны оптического излучения.

При подключении источников И1 и И2 к оптическому мультиплексору фототоки  $I_{1ф}$  и  $I_{2ф}$  измерялись для многомодового оптического волокна. После чего определялась мощность И1 и И2 на основании представленного метода.

При подключении источников И3, И4, И5 и И6 к оптическому мультиплексору выполнялось измерение фототоков  $I_{1ф}$ ,  $I_{2ф}$ ,  $I_{3ф}$  и  $I_{4ф}$  для одномодового оптического волокна. После чего определялась мощность И3, И4, И5 и И6 на основании предложенного метода.

Измерения чувствительности фотоприемника к оптическому излучению с исследуемыми длинами волн экспериментально проводились на основании метода, описанного в ГОСТ 17772-88\*.

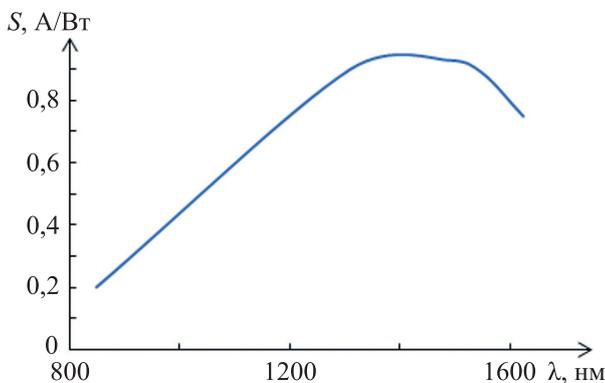


Рис. 2

На рис. 2 представлена зависимость чувствительности этого фотоприемника от длины волны падающего на него оптического излучения. Эта зависимость использовалась при вычислении мощности оптического излучения для каждой длины волны оптического излучения.

При проведении исследований определялись зависимости коэффициента уменьшения фототока  $k$  от радиуса макроизгиба оптического волокна  $R$ . Величина  $k$  в этом случае определялась (в децибелах, поскольку в исследуемом диапазоне радиусов коэффициенты могли отличаться на несколько порядков) по следующей формуле:

$$k = 10 \lg \left( \frac{I_0}{I_{\phi}} \right), \quad (3)$$

где  $I_0$  — фототок, протекающий через фотоприемник в отсутствие макроизгиба;  $I_{\phi}$  — фототок, протекающий через фотоприемник при наличии макроизгиба. Для других случаев коэффициент уменьшения фототока находился по формуле  $k = I_{\phi}/I_0$ .

\* ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1988. 65 с.

Все измерения, представленные в настоящей статье, выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019\*. При этом обеспечивались следующие условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 гПа.

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые и широко применяемые в оптических кабелях оптические волокна G651 (многомодовое), G652, G655 и G657 (одномодовые).

**Результаты измерений и их обсуждение.** Выполнены исследования зависимости коэффициента уменьшения фототока фотоприемника  $k$  от радиуса макроизгиба  $R$  для различных длин волн оптического излучения. На рис. 3, а представлены типичные зависимости  $k$  от  $R$ , полученные для волокна G655. Таким же образом ведут себя зависимости для других исследуемых одномодовых оптических волокон. Как видно из рис. 3, а (1 —  $\lambda = 1310$ , 2 — 1490, 3 — 1550, 4 — 1625 нм), уменьшение радиуса макроизгиба приводит к увеличению  $k$ . Аналогичным образом ведет себя зависимость  $k$  от  $R$ , полученная для многомодового оптического волокна G651 (см. рис. 3, б; 5 —  $\lambda = 850$ , 6 — 1300 нм).

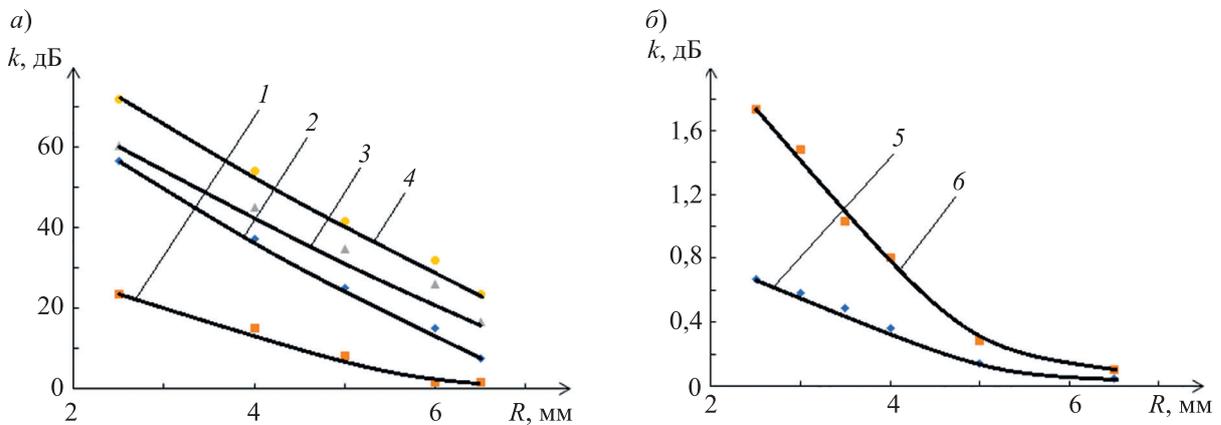


Рис. 3

Такое поведение зависимостей  $k$  от  $R$  связано со смещением модового пятна относительно оптической оси сердцевины волокна на некоторую величину, которая зависит от радиуса изгиба. Чем меньше радиус макроизгиба, тем большее смещение модового пятна происходит. При этом большая часть мощности оптического излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна в области макроизгиба, переходит в оболочку этого волокна, после чего выходит за пределы оптического волокна, а значит, не поступает на фотоприемник.

Для одномодовых оптических волокон при одинаковых радиусах макроизгиба наибольшее значение  $k$  соответствует длине волны 1625 нм, а для многомодовых — 1300 нм.

В табл. 1 представлены данные о коэффициентах уменьшения фототока фотоприемника для трех радиусов макроизгиба одномодового оптического волокна и одного радиуса — для многомодового. Радиус каждого оптического волокна подбирался так, чтобы обеспечить отличие коэффициентов уменьшения фототока фотоприемника на каждой из исследуемых длин волн. Также значения радиуса подбирались для упрощения решения систем уравнений (1) и (2). Отметим: чем точнее подобраны радиусы  $R_1, R_2, R_3$ , тем меньше погрешность определения мощности оптического излучения для каждого значения  $\lambda$ .

В табл. 2 представлены результаты определения мощности оптического излучения, направляемого в оптическое волокно, для каждой длины волны. Из данных таблицы следует, что разница  $\Delta W$  вычисленных  $W_p$  и измеренных  $W_n$  значений мощности не превысила 12,5 % для всех исследуемых волокон.

\* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2021. 32 с.

Таблица 1. Коэффициенты уменьшения фототока при разных радиусах макроизгибов оптических волокон

Тип волокна	$\lambda$ , нм	Радиус макроизгиба, мм			Коэффициент уменьшения фототока фотоприемника		
		$R_1$	$R_2$	$R_3$			
G652 (одномодовое)	1310	3,0	3,5	4,0	$k_{11} = 0,04$	$k_{21} = 0,40$	$k_{31} = 0,59$
	1490				$k_{12} = 0$	$k_{22} = 0,06$	$k_{32} = 0,13$
	1550				$k_{13} = 0$	$k_{23} = 0$	$k_{33} = 0,03$
	1625				$k_{14} = 0$	$k_{24} = 0$	$k_{34} = 0$
G655 (одномодовое)	1310	5,0	6,0	6,5	$k_{11} = 0,15$	$k_{21} = 0,82$	$k_{31} = 0,90$
	1490				$k_{12} = 0$	$k_{22} = 0,05$	$k_{32} = 0,22$
	1550				$k_{13} = 0$	$k_{23} = 0$	$k_{33} = 0,08$
	1625				$k_{14} = 0$	$k_{24} = 0$	$k_{34} = 0$
G657 (одномодовое)	1310	3,5	4,5	5,0	$k_{11} = 0,15$	$k_{21} = 0,38$	$k_{31} = 0,48$
	1490				$k_{12} = 0$	$k_{22} = 0,06$	$k_{32} = 0,09$
	1550				$k_{13} = 0$	$k_{23} = 0$	$k_{33} = 0,04$
	1625				$k_{14} = 0$	$k_{24} = 0$	$k_{34} = 0$
G651 (многомодовое)	850	2,5	—	—	$k_{11} = 0,97$		
	1300				$k_{12} = 0,93$		

Таблица 2. Вычисленные значения мощности оптического излучения для различных длин волн на выходе оптического волокна

$\lambda$ , нм	$W_{in}$ , мкВт	$W_p$ , мкВт	$\Delta W$ , мкВт
Одномодовое оптическое волокно G652			
1310	99,3	104,4	5,1 (4,9 %)
1490	91,2	91,4	0,2 (0,2 %)
1550	90,9	87,2	3,7 (4,1 %)
1625	109,8	111,6	1,8 (1,6 %)
Одномодовое оптическое волокно G655			
1310	100,0	102,0	2,0 (2,0 %)
1490	92,1	89,4	2,7 (3,0 %)
1550	86,5	84,9	1,6 (1,9 %)
1625	91,9	96,4	4,5 (4,7 %)
Одномодовое оптическое волокно G657			
1310	99,5	103,3	3,8 (3,7 %)
1490	90,8	87,7	3,1 (3,4 %)
1550	89,9	85,2	4,7 (5,2 %)
1625	111,8	112,9	1,1 (1,0 %)
Многомодовое оптическое волокно G651			
850	14,4	16,4	2,0 (12,2 %)
1300	158,1	157,5	0,6 (0,38 %)

Таким образом, можно утверждать, что предложенный метод может быть использован для определения длины волны оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну, и мощности излучения на этой длине.

Если вычисленное значение мощности оптического излучения на выходе волокна равно нулю, это следует интерпретировать как отсутствие в волокне излучения с соответствующей длиной волны.

**Заключение.** Предложен метод определения на выходе оптического волокна излучения заданной длины волны и мощности при помощи макроизгибов различного радиуса. Преимуществом метода служит то, что он базируется на использовании достаточно простого оборудования и может применяться в полевых условиях. Показано, что метод применим как для одномодовых, так и для многомодовых оптических волокон.

Показано, что погрешность определения мощности с использованием предложенного метода не превышает 12,5 % для всех исследуемых видов оптических волокон.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2016. 265 с.
2. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001. 267 с.
3. Ионов А. Д. Волоконно-оптические линии передачи. Новосибирск: СибГУТИ, 2003. 152 с.
4. Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 282 с.
5. Мильков А. В., Яковлев М. Я. Оценка надежности оптического волокна на основе испытаний на кратковременную прочность и статическую усталость // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2002. № 1-2. С. 86–90.
6. Фомичев В. Н., Евдочков В. В. Анализ причин повреждений волоконно-оптических линий связи // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2012. № 2(25). С. 24–26.
7. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
8. Ситнов Н. Ю. Исследование методов ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: автореф. дис. ... канд. наук. Новосибирск, 2011. 26 с.
9. Glaesemann G. S. Optical fiber mechanical reliability. Review of research at Corning's optical fiber strength laboratory. White paper. NY: Corning Incorporated, 2017. 62 p.
10. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. 248 с.
11. Agilent Spectrum Analysis Basics. USA: Agilent Technologies, 2000. 64 p.
12. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
13. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. NY: Wiley-Interscience, 2002. 530 p.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Андрей Олегович Зеневич**

— д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by

**Евгений Владимирович Новиков**

— канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, директор Института современных технологий связи; E-mail: e.novikov@bsac.by

**Татьяна Александровна Матковская**

— аспирант; Белорусская государственная академия связи; кафедра физических и математических основ информатики; E-mail: tandem7m@gmail.com

**Шваков Андрей Васильевич**

— магистрант; Белорусская государственная академия связи; факультет электросвязи; E-mail: V-i-a-n-d-y@yandex.by

Поступила в редакцию 24.03.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 19.06.2024.

#### REFERENCES

1. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskiye seti i sistemy svyazi* (Fiber Optic Networks and Communication Systems), Moscow, 2016, 265 p. (in Russ.)
2. Ubaydullaev R.R. *Volokonno-opticheskiye seti* (Fiber Optic Networks), Moscow, 2001, 267 p. (in Russ.)
3. Ionov A.D. *Volokonno-opticheskiye linii peredachi* (Fiber Optical Transmission), Novosibirsk, 2003, 152 p. (in Russ.)

4. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. *Volokonno-opticheskiye kabeli i linii svyazi* (Fiber Optic Cables and Communication Lines), Moscow, 2002. 282 p. (in Russ.)
5. Milkov A.V., Yakovlev M.Ya. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya*, 2002, no. 1-2, pp. 86–90. (in Russ.)
6. Fomichev V.N., Evdochkov V.V. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2012, no. 2(25), pp. 24–26. (in Russ.)
7. Listvin A.V., Listvin V.N. *Reflektometriya opticheskikh volokon* (Reflectometry of Optical Fibers), Moscow, 2005, 208 p. (in Russ.)
8. Sitnov N.Yu. *Issledovaniye metodov ranney diagnostiki volokonno-opticheskikh liniy peredachi* (Study of Methods for Early Diagnosis of Fiber-Optic Transmission Lines), Extended abstract of candidate's thesis, Novosibirsk, 2011, 26 p. (in Russ.)
9. Glaesemann G.S. *Optical fiber mechanical reliability. Review of research at corning's optical fiber strength laboratory*, White paper, NY, Corning Incorporated, 2017, 62 p.
10. Afonskij A.A., Dyakonov V.P. *Tsifrovyye analizatory spektra, signalov i logiki* (Digital Spectrum, Signal and Logic Analyzers), Moscow, 2010. 248 p. (in Russ.)
11. *Agilent Spectrum Analysis Basics*, USA, Agilent Technologies, 2000, 64 p.
12. Listvin A.V., Listvin V.N., Shyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibres for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)
13. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*, NY, Wiley-Interscience, 2002, 530 p.

#### DATA ON AUTHORS

<b>Andrey O. Zenevich</b>	— Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
<b>Eugeny V. Novikov</b>	— PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Technologies of Communications; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
<b>Tatiana A. Matkovskaia</b>	— Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science; E-mail: tandem7m@gmail.com
<b>Andrey V. Shvakov</b>	— Master Student; Belarusian State Academy of Communications, Faculty of Telecommunications; E-mail: V-i-a-n-d-y@yandex.by

Received 24.03.2024; approved after reviewing 17.04.2024; accepted for publication 19.06.2024.