

Научная статья

УДК 621.382

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20



Исследования свойств микроизгиба одномодового оптического волокна

Иван Романович Гулаков, gulakov@bsu.by

Андрей Олегович Зеневич, a.zenevich@bsac.by

Татьяна Александровна Матковская✉, t.matkovskaya@bsac.by

Евгений Владимирович Новиков, e.novikov@bsac.by

Белорусская государственная академия связи,
Минск, 220114, Республика Беларусь

Аннотация: Работа посвящена исследованию свойств микроизгиба оптического волокна. Показано, что увеличение диаметра микроизгиба при неизменном усилии в области его формирования приводило к росту мощности оптического излучения, выводимого из волокна в области микроизгиба. Установлено, что наименьшая величина ответвляемой в области микроизгиба мощности оптического излучения и наименьшая величина потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдается для оптического волокна G657. Наибольшее значение величины ответвляемой в области микроизгиба мощности излучения и наибольшее значение величины потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдается для оптического волокна G655. Результаты статьи могут найти применение в системах защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи.

Ключевые слова: микроизгиб, свойства микроизгиба, оптическое волокно, канал утечки информации, информационная безопасность

Ссылка для цитирования: Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Матковская Т.А., Новиков Е.В. Исследование свойств микроизгиба одномодового оптического волокна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 15–20. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20

Investigations of Single-Mode Optical Fiber Microbending Properties

Ivan Gulakov, gulakov@bsu.by

Andrey Zenevich, a.zenevich@bsac.by

Tatiana Matkovskaia✉, t.matkovskaya@bsac.by

Evgeniy Novikov, e.novikov@bsac.by

Belarusian State Academy of Communications,
Minsk, 220114, Republic of Belarus

Abstract: This research is devoted to the study of the properties of the microbending of an optical fiber. It is shown that an increase in the diameter of a microbend at a constant force in the area of its formation led to an increase in the power of optical radiation output from the fiber in the area of the microbend. It has been established that the smallest value of the optical radiation power branched in the microbending region and the smallest value of the radiation power loss at the microbending for the entire range of wavelengths under study is observed for the G657 optical fiber. The largest value of the radiation power branched off in the microbending region and the largest value of the radiation power loss at the microbending for the entire range of wavelengths under study is observed for the G655 optical fiber. The results of the article can be used in systems for protecting information transmitted over fiber-optic communication lines.

Keywords: *microbending, microbending properties, optical fiber, information leakage channel, information security*

For citation: Gulakov I., Zenevich A., Matkovskaya T., Novikov E. Investigations of Single-Mode Optical Fiber Microbending Properties. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):15–20. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20

Введение

Для передачи информации широко используются волоконно-оптические линии связи. В таких линиях связи информационные сигналы распространяются внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой [1–3]. Несмотря на наличие защитной оболочки, существуют различные способы формирования каналов утечки информации из оптического волокна [4]. Одним из таких способов является формирование макроизгибов оптического волокна [5, 6].

Макроизгиб представляет собой любое макроскопическое отклонение оси оптического волокна от прямой линии [7]. Радиус макроизгиба $R_{\text{мак}}$ значительно больше диаметра оптического волокна (как правило $R_{\text{мак}} \geq 2$ мм). К примеру, макроизгиб можно получить, согнув оптическое волокно вокруг цилиндрической поверхности. В области макроизгиба с боковой поверхности волокна наблюдается выход сигнального оптического излучения за пределы волокна. Для регистрации этого излучения достаточно использовать доступные оптико-электронные конвертеры и компьютер. Такой способ организации утечки передаваемой по оптическому волокну информации прост в реализации и получил достаточно широкое распространение.

Другим способом организации утечки передаваемой по оптическому волокну информации является создание микроизгибов оптического волокна. При этом количественные критерии параметров отводимой мощности оптического излучения и элементов изгиба оптического волокна, которые определяют возможность отвода излучения к фотоприемникам несанкционированного пользователя, в литературе рассмотрен недостаточно.

Под микроизгибом понимается резкое изменение кривизны оптического волокна, представляющее локальное осевое смещение порядка нескольких микрометров [8]. Микроизгиб отличается от макроизгиба тем, что радиус микроизгиба $R_{\text{мик}}$ меньше диаметра оптического волокна.

Микроизгибы возникают при производстве оптического волокна, а также при производстве и прокладке оптического кабеля. Они могут быть обусловлены волнистостью поверхности сердцевины и оболочки, появляться в результате температурных расширений и сжатий непосредственно волокна и защитных покрытий, в процессе изготовления из волокон кабеля и наложения защитного покрытия, из-за дефектов в защитном покрытии, таких как пу-

стоты, микротрещины, частицы примесей, неоднородности покрывающего материала. При наматывании волокна с увеличенным натяжением проявление дефектов имеет тенденцию увеличиваться. Причиной микроизгибов может стать наматывание оптического волокна на предметы с грубой поверхностью. Микроизгибы появляются в тех случаях, когда оптическое волокно располагается в ограниченном пространстве и его необходимо наматывать на катушку малого диаметра [9–11].

Сформировать микроизгиб достаточно просто путем воздействия на волокно с определенным усилием предметом небольших размеров. В результате в области микроизгиба наблюдается выход оптического излучения, несущего информационный сигнал с боковой поверхности волокна, за его пределы. Такой способ формирования канала утечки также является достаточно простым в реализации.

Кроме этого, при формировании канала съема информации с помощью макроизгиба покидающее волокно оптическое излучение рассредоточено вдоль всей его области и полностью собрать это излучение для регистрации не удастся. Напротив, для микроизгиба, имеющего малые размеры, покидающее волокно оптическое излучение сосредоточено в малой области волокна и легко может быть практически полностью собрано и зарегистрировано. Поэтому формирование канала утечки информации при помощи микроизгиба предпочтительно по сравнению с созданием такого канала на основе макроизгиба.

Для проектирования систем обнаружения микроизгибов оптического волокна необходимо знать их характеристики. Одними из наиболее важных характеристик микроизгиба являются вносимые ими дополнительные потери мощности излучения в оптическом волокне и уровень мощности оптического сигнала, отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба. Первое из этих свойств определяет возможность обнаружения факта наличия канала утечки информации. Второе определяет возможность использования микроизгиба для съема данных посредством такого канала утечки. Однако данные свойства микроизгиба оптического волокна в настоящее время практически не исследованы. Поэтому целью настоящей работы является определение этих свойств микроизгиба оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна G652, G655 и G657, поскольку они достаточно часто применяются в оптических кабелях. На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментальной установки для проведения исследования свойств микроизгиба. На схеме введены следующие обозначения: ИИ – источник излучения; ОВ – оптическое волокно; ИМ – измеритель мощности; МИ – микроизгиб; ПР – проволока; П1, П2 – текстолитовые пластины; ГР1, ГР2 – грузы; Д – диафрагма; ФД – фотоприемник; А – амперметр; В – вольтметр; ИП – источник питания, R_n – резистор нагрузки.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом: от источника излучения в оптическое волокно вводится оптическое излучение. В процессе исследования существовала возможность направить в волокно излучение следующих длин волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Такие длины волн были выбраны, поскольку они соответствуют «окнам прозрачности» одномодового оптического волокна и на них осуществляется передача информации [1–3].

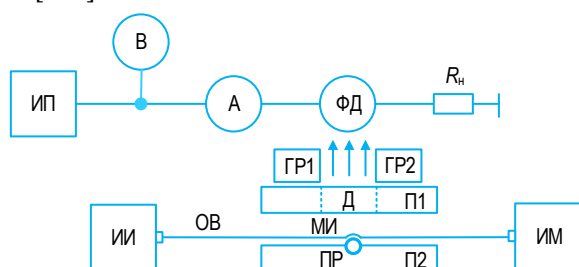


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block Diagram of the Experimental Setup

Мощность вводимого в волокно оптического излучения для всех длин волн была одинаковой и составляла 1 мВт. Такая мощность излучения наиболее часто используется в передатчиках информации волоконно-оптических линий связи [12].

К выходу волокна ОВ подключен измеритель мощности излучения. Длина оптического волокна составляет 1 м, что позволяет пренебречь потерей мощности оптического излучения в волокне на исследуемых длинах волн, так как потеря мощности в этих волокнах на всех исследуемых длинах волн не превышала 0,4 дБ/км.

Волокно подключалось к измерителю мощности излучения и источнику ИИ при помощи отрезков оптического волокна, оконцованных разъемами FC. Источник оптического излучения и измеритель мощности входят в состав оптического тестера ОТ-3-1, поверенного и откалиброванного перед проведением измерений.

Измерения потери мощности излучения на микроизгибе выполнялись на основе метода вносимых

потерь, определенного стандартом ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012, с учетом других требований этого стандарта. Отметим, что дистанция установления модового равновесия для исследуемых ОВ и разъёмных соединений FC не превышала 0,1 мм [13].

На волокне ОВ формируется микроизгиб. Для формирования микроизгиба использовалась медная проволока с диаметрами от 100 до 200 мкм. Выбор диаметров проволоки определялся тем, что при диаметрах больших 200 мкм происходил излом оптического волокна, а при меньших 100 мкм потеря мощности излучения на микроизгибе практически отсутствовала.

Место формирования микроизгиба располагалось в середине используемого отрезка волокна. Отметим, что в контрольных измерениях использовались отрезки волокна в 5 и 10 м, при этом результаты совпадали в пределах погрешности измерительной аппаратуры.

При формировании изгиба медная проволока располагалась перпендикулярно волокну ОВ. Проволока вдавливалась в волокно ОВ при помощи двух сжимаемых с определенным усилием пластин П1 и П2, как это показано на рисунке 1.

Усилие, которым осуществлялось формирование микроизгиба на волокне, создавалось при помощи грузов ГР1 и ГР2. Грузы располагались на верхней пластине П1, при этом нижняя пластина П2 располагалась на горизонтальной твердой поверхности (см. рисунок 1). Общая масса грузов оставалась постоянной и равной $m = 1,25$ кг. Величина m была подобрана таким образом, чтобы она соответствовала минимальному усилию, при котором наблюдается выход оптического излучения за пределы волокна в области микроизгиба для всех исследуемых оптических волокон, длин волн и диаметров проволоки. Для меньших значений массы не удавалось зафиксировать выход излучения за пределы волокна G657 в области микроизгиба. При больших значениях массы возникал излом волокна при формировании микроизгиба проволокой толщиной 200 мкм.

В верхней пластине П1 установлена диафрагма, напротив которой с одной стороны располагался микроизгиб, а с другой – фотоприемник. В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод ФД-110ГА, примененный ввиду того, что он чувствителен к оптическому излучению исследуемых длин волн.

На фотоприемник подается напряжение обратного смещения U_n от источника постоянного напряжения. Величина напряжения обратного смещения контролируется при помощи вольтметра. Амперметр используется для измерения электрического тока, протекающего через фотоприемник. Для ограничения величины тока, протекающего через фотоприемник, применяется резистор

нагрузки, который включен последовательно с фотоприемником. Величина сопротивления резистора нагрузки равна $R_n = 1$ кОм.

При проведении исследований определяется фототок фотоприемника (I_Φ). Для этого измеряются величины электрического тока I_T и I , протекающего через фотоприемник в отсутствии оптического излучения в волокне и при его наличии, соответственно. Величина I_T измеряется при закрытой диафрагме, а значение I – при открытой. Фототок вычисляется по формуле: $I_\Phi = I - I_T$.

По величине фототока определялась мощность оптического излучения, поступающего от микроизгиба на фотоприемник: $P_\Phi = I_\Phi / S$, где S – чувствительность фотоприемника.

При проведении экспериментальных исследований определялись дополнительно вносимые потери мощности излучения D_n и уровень мощности оптического сигнала, отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба D_b . Величина D_n определяется по выражению [14]:

$$D_n = 10 \lg \left(\frac{P_b}{P} \right), \quad (1)$$

где P – мощность ИИ; P_b – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ.

Уровень мощности оптического сигнала D_b , отводимого за пределы оптического волокна в области микроизгиба, вычисляется по выражению:

$$D_b = 10 \lg \left(\frac{I_\Phi / S}{P} \right). \quad (2)$$

Исследования выполнялись при температуре окружающей среды $T = 293$ К.

Результаты измерений и их обсуждение

В процессе калибровки установки было определено напряжение обратного смещения фотоприемника, соответствующее максимуму его чувствительности. Дальнейшие измерения выполнялись при этом напряжении. Характеристики фотоприемника представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики фотоприемника

TABLE 1. Characteristics of the Photodetector

Напряжение питания, В	Длина волны, нм	Чувствительность, А/Вт
19	1310	0,13
	1490	0,16
	1550	0,15
	1625	0,03

В процессе исследования установлены зависимости величины D_n от диаметра формирующей микроизгиб проволоки d . Зависимости D_n от d для оптического волокна G655 представлены на рисунке 2. Для других оптических волокон эти зави-

симости были аналогичными. Как видно из полученных зависимостей, увеличение диаметра проволоки, формирующей микроизгиб, приводило к уменьшению величины D_n , а значит – росту потери мощности оптического излучения на микроизгибе.

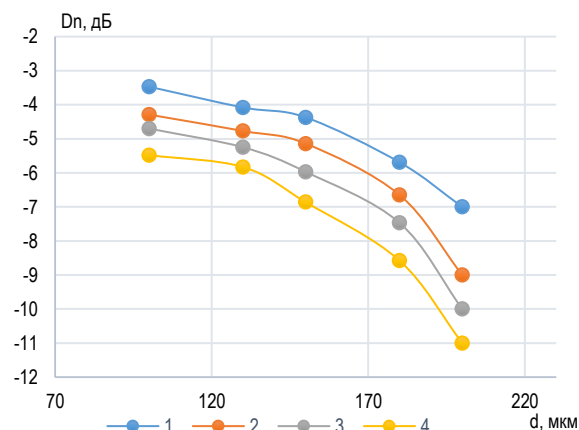


Рис. 2. Зависимость потери мощности на микроизгибе от диаметра микроизгиба для ОВ G655 для разных длин волн: 1 – 1310 нм; 2 – 1490 нм; 3 – 1550 нм; 4 – 1625 нм

Fig. 2. Depends of Power loss on Microbending Diameter for OF G655 for Different Wavelengths: 1 – 1310 nm; 2 – 1490 nm; 3 – 1550 nm; 4 – 1625 nm

Такое поведение зависимости D_n от d связано с тем, что создание микроизгиба с большим диаметром приводит к сужению большей части сердцевины оптического волокна, чем для микроизгиба с меньшим d .

Для постоянного значения d с ростом длины волны наблюдалось уменьшение D_n . Таким образом, можно утверждать, что при неизменном диаметре микроизгиба и постоянной мощности оптического излучения большие потери мощности будут наблюдаться для излучения с большей длиной волны. Такое поведение зависимости D_n от d обусловлено тем, что происходит увеличение модового пятна оптического излучения и увеличение потерь мощности на микроизгибе.

Также в процессе проведенных исследований были установлены зависимости величины D_b от диаметра формирующей микроизгиб проволоки d . Зависимости D_b от d для исследуемых длин волн (1 – 1310 нм, 2 – 1490 нм, 3 – 1550 нм, 4 – 1625 нм) и оптического волокна G655 представлены на рисунке 3. Для других оптических волокон эти зависимости были аналогичными. Как видно из полученных зависимостей, увеличение диаметра микроизгиба приводило к росту величины D_b , а значит – к увеличению мощности оптического излучения, ответвляемой с микроизгиба. Такое поведение зависимости D_b от d связано с тем, что создание микроизгиба с большим диаметром, как было отмечено ранее, приводит к сужению большей части сердцевины оптического волокна, чем для микроизгиба с меньшим d .

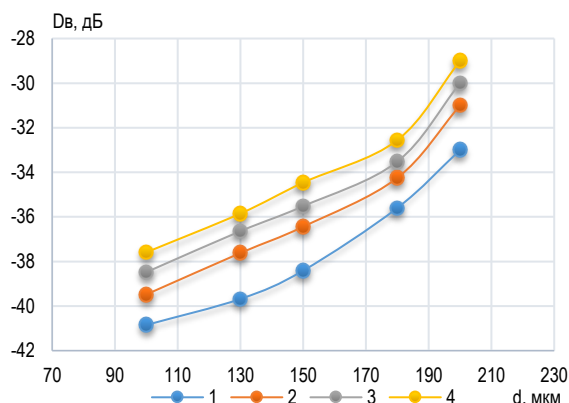


Рис. 3. Зависимость уровня мощности оптического сигнала, отводимого за пределы волокна в области микроизгиба, от диаметра изгиба

Fig. 3. Dependence of the Power Level of the Optical Signal Removed Outside the Fiber in the Microbend Region on the Bend Diameter

В связи с этим большая часть мощности оптического излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна в области микроизгиба, переходит в оболочку, а после покидает волокно через ее боковую поверхность.

Для постоянного значения диаметра формирующей микроизгиб проволоки d с ростом длины волны наблюдался рост величины D_b . Таким образом, можно утверждать, что при неизменном диаметре микроизгиба и постоянной мощности оптического излучения ответвляется большая мощность для излучения с большей длиной волны. Это связано с тем, что увеличение длины волны приводит к росту диаметра модового пятна, а значит, и его площади. Чем больше площадь модового пятна, тем большая часть распространяющегося по волокну излучения оказывается в оболочке оптического волокна. Затем это излучение покидает волокно через его боковую поверхность.

Такое поведение зависимости $D_b(d)$ наблюдалось и для макроизгибов: уменьшение диаметра приводило к росту величины D_b , а значит – к увеличению мощности оптического излучения, ответвляемой с макроизгиба [14].

В таблице 2 представлены значения D_n и D_b (в дБ) для наибольшего значения диаметра микроизгиба – 200 мкм из исследуемого диапазона d . Для

этого диаметра наблюдались наименьшие значения D_n и наибольшие значения D_b для всех исследуемых длин волн.

ТАБЛИЦА 2. Характеристики микроизгиба оптического волокна с диаметром 200 мкм

TABLE 2. Microbending Characteristics of Optical Fiber with a Diameter of 200 μm

Тип ОВ	Длина волны, нм							
	1310		1490		1550		1625	
	D_n	D_b	D_n	D_b	D_n	D_b	D_n	D_b
G652	-4	-34	-5	-32	-6	-31	-7	-30
G655	-8	-33	-9	-31	-10	-30	-11	-29
G657	-2	-35	-3	-33	-4	-32	-5	-31

Как следует из данных, представленных в таблице, наибольшее значение D_n и наименьшее D_b для всех исследуемых волн наблюдается для оптического волокна G657. Наименьшее значение D_n и наибольшее D_b для всех исследуемых волн наблюдается для оптического волокна G655.

Закключение

Установлено, что увеличение диаметра микроизгиба при неизменном деформирующем усилии в области его формирования приводило к росту мощности оптического излучения, ответвляемой с микроизгиба.

Показано, что наименьшая величина ответвляемой в области микроизгиба мощности оптического излучения и наименьшие потери мощности излучения на микроизгибе для всех исследуемых длин волн наблюдаются для оптического волокна G657.

Определено, что наибольшее значение ответвляемой в области микроизгиба мощности излучения и наибольшее значение потери мощности излучения на микроизгибе для всего диапазона исследуемых длин волн наблюдаются для оптического волокна G655.

Таким образом, из исследованных оптических волокон наименее уязвимым для несанкционированного доступа к передаваемой информации при использовании микроизгиба является волокно G657, а наиболее уязвимым – волокно G655.

Список источников

1. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
2. Govind P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 563 p.
3. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб.: Лань, 2021. 268 с.
4. Зеневич А.О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 142 с.
5. Стенина Т.А. Изучение влияния изгибов на оптическое волокно // Евразийский союз ученых. 2015. Т. 11. № 2. С. 70–73.
6. Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2003. 514 с.
7. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. Reference Guide to Fiber Optic Testing. Saint-Etienne: JDS Uniphase Corporation, 2011. 172 p.

8. ГОСТ IEC 60050-731-2017. Международный электротехнический словарь. Глава 731. Волоконно-оптическая связь. М: Стандартинформ, 2020. 41 с.
9. Tosco F. Technical Staff of CSELT: Fiber Optics Communication Handbook. 1990. PP. 241–246.
10. Unger C., Stocklein W. Investigation of the microbending sensitivity of fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1994. Vol. 12. Iss. 4. PP. 591–596. DOI:10.1109/50.285350
11. Малых Ю.В., Шубин В.В. Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*. 2016. № 1. С. 69–79.
12. Варава Н., Пронин С., Никоноров М. Приемные и передающие модули для ВОЛС, использующих пакетную передачу информации // *Первая миля*. 2018. № 5. С. 22–28. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.22.28
13. Шубин В.В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 257 с.
14. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового волокна при помощи кремниевого фотомножителя // *Доклады БГУИР*. 2022. Т. 20. № 6. С. 37–44. DOI:10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44

References

1. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Fiber-Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2010. 576 p.
2. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002. 530 p.
3. Sklyarov O.K. *Fiber-optic networks and communication systems*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2021. 268 p.
4. Zenevich A.O. *Detectors of Information Leakage from Optical Fiber*. Minsk: Belarusian State Academy of Communications Publ.; 2017. 143 p.
5. Stenina T.A. Study of the influence of bends on optical fiber. *Eurasian Union of Scientists*. 2015;11(2):70–73.
6. Freeman R.L. *Fiber-optic communication systems*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2003. 514 p.
7. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. *Reference Guide to Fiber Optic Testing*. Saint-Etienne: JDS Uniphase Corporation; 2011. 172 p.
8. GOST IEC 60050-731-2017. *International Electrotechnical Dictionary. Chapter 731*. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. 41 p.
9. Tosco F. Technical Staff of CSELT: Fiber Optics Communication Handbook. 1990. p.241–246.
10. Unger C., Stocklein W. Investigation of the microbending sensitivity of fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 1994;12(4): 591–596. DOI:10.1109/50.285350
11. Malykh Yu.V., Shubin V.V. Method for calculating the efficiency of radiation transmission from the side surface of a curved single-mode optical fiber to a receiving optical device. *Questions of atomic science and technology. Series of mathematical modeling of physical processes*. 2016;1:69–79.
12. Varava N., Pronin S., Nikonov M. Receiving and transmitting modules for fiber-optic communication lines using packet data transfer. *First Mile*. 2018;5:22–28. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.22.28
13. Shubin V.V. *Information security of fiber-optic systems*. Sarov: All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ.; 2015. 257 p.
14. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaya T.A. Detection of an information leakage channel from a multimode fiber using a silicon photomultiplier. *Doklady BSUIR*. 2022;20(6):37–44. DOI:10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44

Статья поступила в редакцию 21.04.2023; одобрена после рецензирования 28.06.2023; принята к публикации 29.06.2023.

The article was submitted 21.04.2023; approved after reviewing 28.06.2023; accepted for publication 29.06.2023.

Информация об авторах:

ГУЛАКОВ
Иван Романович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>

ЗЕНЕВИЧ
Андрей Олегович

доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>

МАТКОВСКАЯ
Татьяна Александровна

аспирант кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0000-0002-1499-6158>

НОВИКОВ
Евгений Владимирович

кандидат технических наук, доцент, директор Института современных технологий связи Белорусской государственной академии связи

 <https://orcid.org/0009-0009-2944-758X>