

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права  
УДК 681.586.5

**ЛУКАШИК**  
**Татьяна Михайловна**

**ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ МАКРОИЗГИБА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ,  
ОБЪЕКТОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Могилев 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусская государственная академия связи».

Научный руководитель

**Зеневич Андрей Олегович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ректор учреждения образования  
«Белорусская государственная академия  
связи»

Официальные оппоненты:

**Артюхина Нина Константиновна**,  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Лазерная техника и технология»  
Белорусского национального технического  
университета

Оппонирующая организация

**Хижняк Александр Вячеславович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник научно-  
исследовательской лаборатории факультета  
связи и АСУ учреждения образования  
«Военная академия Республики Беларусь»  
**Государственное научное учреждение  
«Институт прикладной физики  
Национальной академии наук  
Беларуси»**

Защита состоится «20» декабря 2024 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.18.02 при Межгосударственном учреждении образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212022, г. Могилев, пр-т Мира, 43, ауд. 323, e-mail: brgu@brgu.by, телефон ученого секретаря +375 (222) 60-33-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета.

Автореферат разослан «16» ноября 2024 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент



С. В. Болотов

## ВВЕДЕНИЕ

Все больше внимания уделяется в настоящее время развитию автоматизированных комплексов в сфере «умных» вещей, домов, городов. Эксплуатация таких комплексов подразумевает применение систем автоматического контроля, осуществляющих мониторинг какого-либо процесса или состояния сложных технических объектов, в которых содержатся датчики. На данный момент времени широкое применение находят электрические датчики. Однако в качестве линий связи с датчиками все чаще используются оптические волокна, постепенно вытесняющие электрические кабели, так как оптические волокна обладают лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с электрическими кабелями. При использовании электрических датчиков в сочетании с оптическими волокнами необходимо фиксируемый сигнал на пути к регистратору подвергнуть нескольким преобразованиям от электрического сигнала в оптические импульсы и обратно, что сказывается на времени обработки и качестве сигнала, а также возникает потребность включения в систему дополнительных устройств. Поэтому волоконно-оптические датчики (ВОД) с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента постепенно и уверенно сменяют электрические датчики, тем более что ВОД могут быть собраны в волоконно-оптические системы на основе передающих волоконно-оптических линий связи. В таких системах отпадает необходимость в преобразовании сигнала на линии передачи – регистрация. Важно отметить, что применение ВОД имеет ряд преимуществ перед использованием электрических датчиков – это быстрдействие, нечувствительность к электромагнитным помехам, большая дальность передачи сигнала без ретрансляторов, взрыво- и пожаробезопасность, надежная работа в агрессивных средах. Сами ВОД отличаются небольшими размерами, весом, малой потребляемой мощностью, низкой стоимостью чувствительных элементов датчиков, возможностью комбинирования отдельных датчиков в измерительные системы.

Однако, несмотря на ряд разработок ВОД, вопросы конструирования простых, технологичных и контролирующих комплекс параметров (двух-трех изменяющихся параметров в одном датчике) не достаточно представлены. Не разработаны также и методики расчета квазираспределенных систем на основе ВОД, позволяющих контролировать состояние протяженных объектов и устройств, находящихся на большом расстоянии от регистрирующего центра.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации соответствует утвержденному научному плану работ учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» и следующему приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг. в соответствии с Указом № 156 от 07.05.2020 г.: средства связи и методы передачи данных, лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование.

Результаты, полученные в диссертационной работе, связаны с выполнением следующих научно-исследовательских работ.

Тема «Распределенная волоконно-оптическая система для охраны периметра» БРФФИ на 2021–2022 гг. (№ ГР 20212625), совместно с Худжандским политехническим институтом Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими, Таджикистан (дог. № Т21ТДЖГ-001 от 30.04.2021).

Тема «Система передачи секретного ключа на основе протоколов квантовой криптографии» БРФФИ на 2021–2022 гг. (№ ГР 20212625), совместно с Национальной академией наук Украины (дог. № Т21УКРГ-010 от 30.04.2021).

Работы связаны с ГПНИ РБ п. 6 «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 гг. (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.08.2010 г. № 1196 (ред. № 711 от 10.12.2021)).

Тема «Системы квантовой сигнализации для обеспечения информационной безопасности волоконно-оптических линий связи» (№ ГР 20212714) по заданию «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.1» на 2021–2025 гг. (дог. № ФИ 05-21 от 07.06.2021).

Тема «Разработка и исследование перспективных оптических датчиков на основе микро- и макроизгибов оптического волокна» по заданию «Фотоника и электроника для инноваций 2.8» подпрограммы «Опто- и СВЧ-электроника» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг. (рег. № НИР 20212713 от 15.12.2023).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель работы состоит в разработке и создании датчиков на основе макроизгиба оптического волокна для контроля параметров окружающей среды, объектов и изделий, а также в создании из совокупности разработанных элементов квазираспределенных волоконно-оптических систем, работающих на выявление места и количества макроизгибов оптического волокна, на котором расположены контролируемые компоненты.

Для осуществления вышеназванных целей в работе решаются следующие взаимосвязанные *задачи*:

– определить физические процессы и факторы, влияющие на затухание мощности оптического излучения в оптическом волокне под внешним физическим воздействием, формирующем макроизгиб;

– разработать волоконно-оптические датчики на основе макроизгибов с использованием длин волн 1310, 1490, 1550, 1625 нм;

– разработать способ построения квазираспределенных систем на основе волоконно-оптических датчиков проникновения на объект;

– предложить системы и устройства для контроля за состоянием объектов на основе макроизгибов оптического волокна.

Исследуемыми **объектами** являются одномодовые оптические волокна, применяемые в телекоммуникациях. **Предметом** исследования является распространение оптического сигнала в оптическом волокне при наличии макроизгиба.

#### **Научная новизна**

Впервые предложено математическое выражение, определяющее зависимость затухания мощности оптического излучения в оптическом волокне от массы груза для разработанного волоконно-оптического датчика массы на основе макроизгиба, которое подтверждено экспериментальными результатами.

Впервые предложено использование волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба, позволяющих контролировать наличие постоянного электрического тока в проводниках.

Впервые разработан не имеющий аналогов волоконно-оптический ответвитель на основе макроизгиба оптического волокна, позволяющий обеспечивать регулировку коэффициента ответвления, отличающийся от существующих возможностью определять наличие как постоянного, так и переменного оптического излучения различной мощности в оптическом волокне, а также обеспечивающий определение длины волны оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну, что подтверждается патентом на изобретение Республики Беларусь.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика определения количества и минимального расстояния между соседними амплитудными волоконно-оптическими датчиками на основе макроизгибов оптического волокна, позволившая создавать квазираспределенные системы на одномодовом волокне, реализуемые в диапазоне длин волн от 1310 до 1625 нм, мощности импульсного оптического излучения от 0,5 до 5 мВт и длительности оптических импульсов от 3 до 1000 нс.

2. Полученные на основе анализа экспериментальных зависимостей ответвленной мощности оптического излучения от радиуса макроизгиба оптического волокна в диапазоне от 2,5 до 10 мм и длины волны оптического излучения в диапазоне 1310...1625 нм оптимальные значения радиуса макроизгиба 3 мм и рабочей длины волны 1625 нм позволили создать волоконно-оптический пожарный датчик, отличающийся от существующих одновременным выполнением мониторинга температуры и задымления, позволяющего осуществлять контроль целостности оптического волокна, и обладающий функцией самовосстановления после восстановления природных факторов до исходных, позволяющей его использовать в пожароопасных условиях.

3. Методика определения длины волны, распространяющейся в оптическом волокне излучения без разрыва этого волокна или отключения его от конечного получателя информации, заключающаяся в формировании двух макроизгибов и отличающаяся от существующих измерением мощности излучения, снимаемого с боковой поверхности оптического волокна в области макроизгибов, позволяющая проводить измерения длины волны оптического излучения в диапазоне от 1310 до 1625 нм.

4. Экспериментальная зависимость амплитуды отклика оптического импульса, отраженного от торца одномодового оптического волокна, от радиуса макроизгиба в виде одного полного витка, полученная для интервала радиусов макроизгиба от 5 до 30 мм и длин волн оптического излучения 1310 и 1625 нм, позволившая создать волоконно-оптический датчик для дистанционного контроля превышения температуры, отличающийся от известных технологичностью и расстоянием дистанционного контроля от 1 до 50 км.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

В диссертационной работе представлены результаты, которые были получены автором лично. Вклад автора в коллективные работы заключается в определении методики исследований, установлении теоретических принципов, постановке и обосновании конкретных научных задач, нахождении методических путей их решения, создании экспериментальных установок и проведении измерений, объяснении полученных экспериментальных данных, а также в создании новых методик и устройств. Экспериментальные исследования, описанные в работе, выполнялись автором лично или с его непосредственным участием.

Совместно с соавторами работ д-м техн. наук, проф. А. О. Зеневичем (научный руководитель), канд. техн. наук, доц. Е. В. Новиковым был поставлен ряд научных задач. Соавторы А. О. Зеневич и Е. В. Новиков ока-

зывали помощь в разработке экспериментальных установок. Соавторами д-м техн. наук, проф. Т. М. Мансуровым, канд. техн. наук, доц. С. В. Ждановичем, А. А. Лагутик, Г. В. Василевским, Т. Г. Коваленко оказана помощь в получении и обработке полученных данных. Обсуждение и анализ данных, полученных в работе, проводился совместно со всеми соавторами.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: XXV, XXVI международные научно-технические конференции «Современные средства связи» (Минск, Беларусь), «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи», XX, XXI, XXII научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов (Минск, Беларусь), 2020–2022 гг., научный семинар «Квантовые информационные системы» (27.07.2021 г., Минск, Беларусь), научный семинар на тему «Инновационные решения в измерительных приборах и сетях телекоммуникаций» (15.06. 2022 г., Минск, Беларусь), научный семинар на тему «Инновационные технические решения для измерительных приборов» (16.03.2022 г., Минск, Беларусь), «Дискуссионная площадка результатов исследований молодых учёных» (27.10.2022 г., Минск, Беларусь).

Результаты исследований использованы в производственном процессе ОАО «ПРОМСВЯЗЬ», СЗАО «БЕЛТЕЛЕКАБЕЛЬ», а также внедрены в образовательный процесс УО «Белорусская государственная академия связи». По результатам исследований получены 2 патента.

### **Опубликованность результатов диссертации**

На основании исследований, представленных в диссертации, опубликовано 14 работ, в их числе 10 статей в научно-технических журналах и сборниках, из которых 5 статей в изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,734 авторского листа). Получены 2 патента Республики Беларусь на изобретение. Результаты, представленные в диссертационной работе, вошли в 4 отчета по НИР.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации – 101 страница машинописного текста, в том числе: 28 рисунков на 26 страницах, 15 таблиц на 15 страницах, приложения. Список использованных источников содержит 102 наименования на 9 страницах, список собственных публикаций соискателя из 16 наименований на 3 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** приведен анализ применения существующих волоконно-оптических датчиков, показано, что волоконно-оптические датчики превосходят электрические датчики по ряду показателей. Показано, что амплитудные волоконно-оптические датчики на основе макроизгиба ОВ имеют преимущества по ряду параметров перед фазовыми, поляризационными, люминесцентными и частотными. При этом принципы построения амплитудных ВОД на основе макроизгиба в настоящее время недостаточно разработаны. Также существует недостаточное количество разработок ВОД с контролем двух и более контролируемых параметров. Помимо этого, не разработаны методы применения ВОД на основе макроизгибов в квазираспределенных оптических системах.

Проведен анализ причин затухания сигнала в ОВ, которые связаны с поглощением и обратно рассеянным оптическим излучением в ОВ, с нарушением закона полного внутреннего отражения в области макроизгиба ОВ, вносящего основной вклад в затухание мощности оптического излучения в области макроизгиба. Показано, что затухание оптического сигнала в ОВ под воздействием макроизгиба представляет интерес для дальнейшей работы.

**Вторая глава** посвящена анализу методов для измерения затухания оптического сигнала под влиянием макроизгиба в ОВ: неразрушающего (вносимые потери) измерения и оптической рефлектометрии. Оба метода позволяют проводить измерения, не разрывая используемое ОВ, и решают вопрос частой заменой сработавших датчиков в процессе постоянного рабочего контроля. Метод оптической рефлектометрии позволяет определять местоположение макроизгиба на испытуемом ОВ, произвести оценку состояния ОВ и соединений волокон по всей длине.

Предложена методика определения параметров квазираспределенной системы на основе волоконно-оптических датчиков с макроизгибами, позволяющая определять оптимальное количество и расположение волоконно-оптических датчиков на ОВ заданной длины. Суть методики заключается в регистрации изменения мощности оптического сигнала при воздействии внешних сил и формировании макроизгибов в нескольких местах расположения датчиков по длине  $L$  одного ОВ. Количество датчиков  $N$  определяется по формуле

$$N = \frac{L - L_m}{\Delta L}, \quad (1)$$

где  $\Delta L$  – минимальное расстояние между двумя ближайшими макроизгибами, определенное по рефлектограммам с учетом длины мертвой зоны по затуханию;

$L_m$  – сумма длин мертвых зон в начале и конце рефлектограммы.

На основании величины динамического диапазона рефлектометра  $K$ , потерь мощности оптического излучения в ОВ и определенного по формуле (1) значения  $N$  находят затухание оптического излучения  $D_m$ , приходящееся на один макроизгиб:

$$D_m = \frac{K - \alpha L}{N} = \frac{(K - \alpha L)\Delta L}{L - L_m}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – это потери оптического излучения на 1 км ОВ.

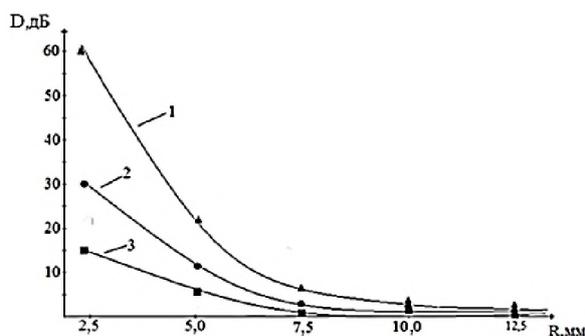
Формула (2) справедлива в случае, если  $K - \alpha L > 0$ . Значение  $D_m$  сравнивают с минимальной величиной затухания на одном макроизгибе  $D_0$ , которое позволяет выявить рефлектометр. Если  $D_m \geq D_0$ , то считается, что на одном ОВ можно разместить  $N$  датчиков. В случае если  $D_m < D_0$ , то для определения количества датчиков необходимо воспользоваться отношением

$$N = \frac{K - \alpha L}{D_0}. \quad (3)$$

Описан метод измерения ответвленного излучения при макроизгибе ОВ и представлена структурная схема экспериментальной установки для измерения мощности оптического излучения, выходящего за пределы ОВ в области макроизгиба. При проведении исследований информативной величиной является фототок  $I_f$  фотодетектора. Мощность вводимого в ОВ оптического излучения  $P$  для всех длин волн была одинаковой и составляла 1 мВт. Такая мощность наиболее часто используется в передатчиках опто-волоконных линий связи.

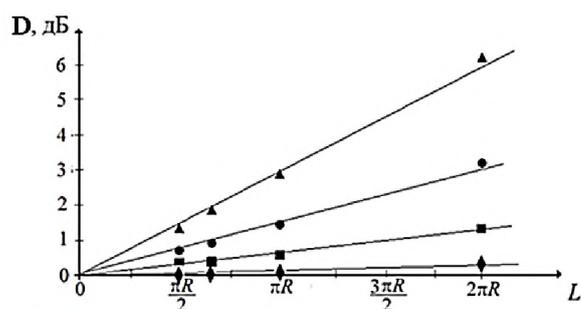
**В третьей главе** приведены результаты исследований затухания мощности оптического излучения в областях макроизгиба ОВ. При наличии макроизгиба затухание зависит от радиуса, длины дуги витка, угла макроизгиба и длины волны проходящего по ОВ оптического излучения. Значение коэффициента затухания возрастает с увеличением длины волны оптического излучения. Наибольшие показатели коэффициента затухания при макроизгибе соответствуют длине волны 1625 нм на всех исследуемых ОВ, наименьшие – длине волны 1310 нм. Зависимость коэффициента затухания оптического излучения в ОВ от радиуса макроизгиба и от длины дуги макроизгиба показаны на рисунках 1 и 2.

При  $R_m \leq 5$  мм для ОВ G655 оптическое излучение с длинами волн 1550 и 1625 нм прекращало свое распространение в ОВ. Для ОВ G652 при этих длинах волн оптическое излучение прекращало свое распространение при  $R_m \leq 2,5$  мм. Для ОВ G657 минимального предельного радиуса макроизгиба не установлено (менее 2 мм), так как дальнейшее уменьшение радиуса макроизгиба приводит к излому ОВ. Экспериментальные данные показывают (таблица 1), что наименьший радиус макроизгиба, при котором достигается заданное значение ослабления мощности оптического излучения в ОВ, соответствует длине волны 1310 нм, а наибольший радиус – длине волны 1625 нм для всех типов ОВ.



1 – один полный виток макроизгиба;  
2 – половина витка; 3 – четверть витка

**Рисунок 1 – Зависимость затухания мощности оптического излучения от радиуса макроизгиба и от длины дуги витка макроизгиба**



Длина волны оптического излучения:  
▲ – 1625 нм; ■ – 1550 нм;  
● – 1490 нм; ◆ – 1310 нм

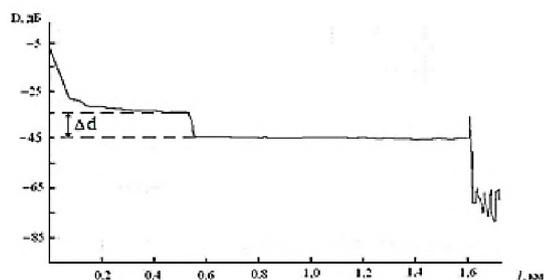
**Рисунок 2 – Зависимости затухания оптического излучения в ОВ от длины дуги**

Таблица 1 – Экспериментальные данные о величине радиуса макроизгиба ОВ для различных длин волн оптического излучения

Тип ОВ	Длина волны, нм	Радиус макроизгиба, мм		
		Ослабление мощности оптического излучения 30 дБ	Ослабление мощности оптического излучения 60 дБ	Ослабление мощности оптического излучения 80 дБ
G652	1310	2,7	2,3	2,2
	1490	3,4	2,7	2,5
	1550	3,8	3,0	2,8
	1625	4,0	3,1	2,8
G655	1310	5,2	4,5	4,2
	1490	5,6	5,0	4,7
	1550	5,9	5,0	4,7
	1625	6,5	5,2	4,8
G657	1310	2,4	Менее 2	Менее 2
	1490	2,5	Менее 2	Менее 2
	1550	3,0	Менее 2	Менее 2
	1625	3,3	2,4	2,2

Установлены зависимости величины затухания мощности оптического излучения от радиуса макроизгиба ОВ для одного полного, половины и четверти витков макроизгиба. К уменьшению затухания при одинаковом радиусе макроизгиба приводит уменьшение длины дуги макроизгиба (рисунок 1). Так, для полного витка макроизгиба наблюдается наибольшее значение  $D$ , а для четверти витка – наименьшее. Установлено, что значение коэффициента затухания принимает наибольшие значения для ОВ марки G655, наименьшие – для ОВ марки G657 при наличии у них макроизгибов одинаковых радиусов. При наличии в ОВ одного макроизгиба на его рефлектограмме появляется одна «ступенька», с высо-

кой  $\Delta d$  – амплитуда затухания при макроизгибе показана на рисунке 3, наиболее четко она проявляется в рефлектограмме при радиусах макроизгиба  $R_M \leq 10$  мм для всех исследуемых ОВ, и ее высота  $\Delta d$  с уменьшением радиуса макроизгиба возрастает.  $\Delta d$  увеличивается при значении  $R_M = \text{const}$  и увеличении длины волны оптического излучения. При постоянных значениях длины волны оптического излучения и радиуса макроизгиба  $\Delta d$  принимает разные значения для различных типов ОВ и принимает максимальные значения для G655. Увеличение



**Рисунок 3 – Рефлектограмма оптического волокна с макроизгибом радиусом 7,5 мм**

длительности оптического импульса  $\tau$  оптического сигнала приводит к расширению динамического диапазона рефлектометра. Однако увеличение величины  $\tau$  приводит и к росту значения  $\Delta L$  – минимального расстояния между макроизгибами. Короткие оптические импульсы понижают точность измерения затухания оптического излучения в ОВ. Для соблюдения компромисса между сокращением расстояния ОВ от рефлектометра до датчика, при котором рефлектометр может определить наличие отраженного оптического импульса, и точностью измерения коэффициента затухания выбирается длительность зондирующего импульса от 3 до 10 нс.

Предложена методика определения количества датчиков и их местоположение на ОВ для квазираспределенной системы в зависимости от длины волны оптического излучения. Определено, что для больших длин волн оптического излучения регистрируется меньшее количество точек воздействия (меньшее количество ВОД), так как возрастает ослабление, вносимое макроизгибом ОВ. При меньших значениях длин волн оптического излучения количество регистрируемых точек воздействия значительно больше, но при больших радиусах макроизгиба и малых длинах макроизгиба (таблица 2).

Предложена методика определения количества датчиков и их местоположение на ОВ для квазираспределенной системы в зависимости от длины волны оптического излучения. Определено, что для больших длин волн оптического излучения регистрируется меньшее количество точек воздействия (меньшее количество ВОД), так как возрастает ослабление, вносимое макроизгибом ОВ. При меньших значениях длин волн оптического излучения количество регистрируемых точек воздействия значительно больше, но при больших радиусах макроизгиба и малых длинах макроизгиба (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристики квазираспределенного датчика в зависимости от параметров макроизгиба

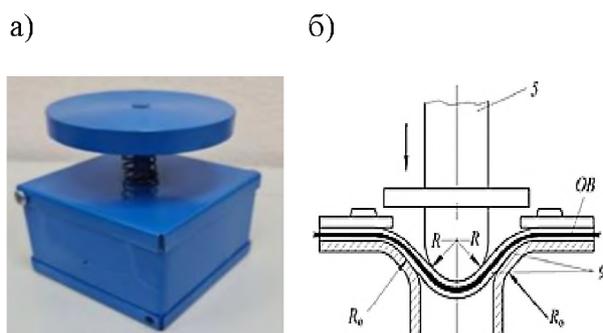
Параметр макроизгиба			Среднее значение ослабления, дБ				$N_{PDmax}$			
Угол, рад	Радиус, мм	Длина, мм	Длина волны оптического излучения, нм							
			1310	1490	1550	1625	1310	1490	1550	1625
$2\pi$	9	56,52	–	1,35	3,7	7,56	–	14	5	2
$\pi$	9	28,3	–	0,55	1,46	2,9	–	33	8	5
$2\pi/3$	9	18,84	–	0,33	0,91	1,58	–	55	13	6
$\pi/2$	9	14,15	–	0,24	0,59	1,17	–	76	20	10

Определено, что для всех типов исследуемых ОВ с уменьшением радиуса изгиба увеличивается мощность снимаемого с изгиба ОВ оптического излучения. Радиус изгиба, при котором наблюдается максимальная мощность

ответвленного оптического излучения, находится в пределах 2...3 мм. Наибольший показатель мощности ответвленного излучения обеспечивается на одномодовом ОВ G 655 при макроизгибе радиусом 2,5 мм и длине волны оптического излучения 1490 нм. Определено, что каждой длине волны при одинаковом значении радиуса макроизгиба ОВ соответствует свое значение мощности ответвляемого оптического излучения – коэффициент ответвления  $D_6$ .

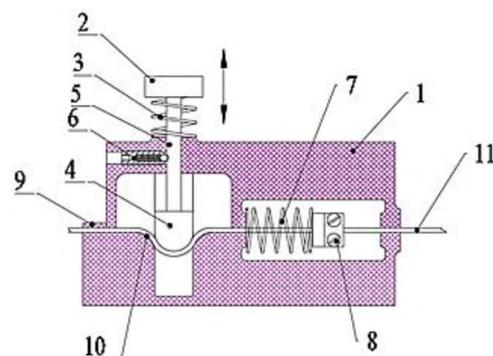
Используя разность  $\Delta$  между мощностями ответвляемого оптического излучения с одной и той же длиной волны для разных радиусов  $r_1$  и  $r_2$  макроизгибов, определяем длину волны оптического излучения, передаваемого по ОВ.

**Четвертая глава** посвящена описанию разработанных конструкций ВОД. ВОД массы показан на рисунке 4. Экспериментальные исследования модели датчика показали возможность его использования для измерения массы тел в определенном диапазоне. Диапазон масс можно изменять при изменении коэффициента жесткости пружины. Технические характеристики датчика: применяемое ОВ – G655; длина волны оптического излучения – 1625 нм; радиус макроизгиба – 7,5 мм. На рисунке 5 показана конструкция датчика обнаружения проникновения.



а – датчик; б – схема образования макроизгиба при воздействии стержня 5 на ОВ

**Рисунок 4 – Датчик массы**



1 – корпус; 2 – кнопка; 3, 7 – пружины; 4 – поршень; 5 – стержень; 6 – пружинный фиксатор с шариком; 8 – пружинная планка; 9 – планка; 10 – направляющие для ОВ; 11 – ОВ

**Рисунок 5 – Конструкция датчика обнаружения проникновения**

Характеристики датчика представлены в таблице 3, датчик является самовосстанавливающимся. Датчики можно подключать к одному ОВ для охвата протяженного объекта охраны. В датчике выбран максимальный радиус макроизгиба, который обнаруживался рефлектометром при времени накопления 1 с. Использование такого радиуса макроизгиба в датчике позволяет достаточно успешно обнаруживать место проникновения на объект по рефлектограмме и устанавливать большее количество датчиков на единицу длины ОВ.

Предложено устройство волоконно-оптического пожарного датчика с плавким замком (рисунок 6). В основу работы датчика положен эффект появления отраженного от торца ОВ отклика при исчезновении макроизгиба ОВ при пороговом повышении фоновой температуры окружающей среды. Характеристики датчика приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Характеристики датчика обнаружения проникновения на объект

Оптическое волокно	Длина волны оптического излучения, нм	Радиус макроизгиба, мм	Длительность импульса рефлектометра, нс	Минимальное расстояние между двумя датчиками, м
G655	1625	7,5	3	2,2

Таблица 4 – Характеристики пожарного датчика

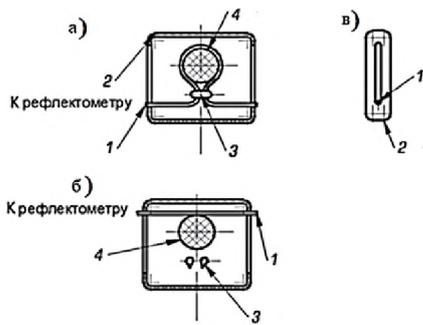
Тип используемого ОВ	Температура срабатывания, К	Радиус макроизгиба ОВ, мм	Рабочая длина волны излучения, нм	Минимальное расстояние до датчика, м	Длительность импульса, нс
G652	320	5	1625	100	10

Разработан самовосстанавливающийся тепловой датчик для контроля предельной температуры нагрева окружающей среды, наличия задымления и контроля целостности (отсутствия повреждений или разрывов) ОВ (рисунок 7). Датчик рассчитан для ОВ G655, длины волны 1625 нм. Срабатывание происходит при температуре 315 К, радиусе макроизгиба  $3 \pm 1$  мм (таблица 5).

Таблица 5 – Характеристики самовосстанавливающегося теплового датчика на основе макроизгиба

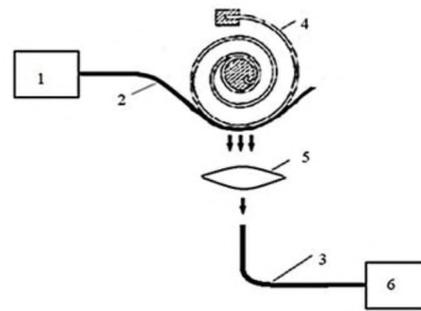
Тип используемого ОВ	Температура срабатывания, К	Радиус макроизгиба в пределах ОВ, мм	Рабочая длина волны оптического излучения, нм	Максимальная протяженность ОВ, км	Центральный угол макроизгиба, град
G655	315	$3 \pm 1$	1625	42	180

В пятой главе представлены разработанные системы и устройства для контроля за состоянием объектов на основе макроизгибов ОВ. Определено, что для оптических волокон G652 и G655 при длинах волн оптического излучения 1310, 1490, 1550, 1625 нм, а для ОВ G657 при длине волны 1625 нм, существуют радиусы макроизгиба ОВ, при которых наблюдается практически полное ослабление мощности оптического излучения (более 80 дБ). Значение радиуса макроизгиба, для которого наблюдается практически полное ослабление мощности оптического излучения мощностью 1 Вт, для постоянной длины волны оптического излучения зависит от типа ОВ. Для исследуемых типов ОВ наибольшее значение такого радиуса наблюдалось для ОВ G655 при всех длинах волн. Предложена конструкция оптического переключателя нового типа на основе макроизгиба ОВ. Его структурная схема представлена на рисунке 8. Детализированная схема формирователя макроизгиба для оптического переключателя представлена на рисунке 9.



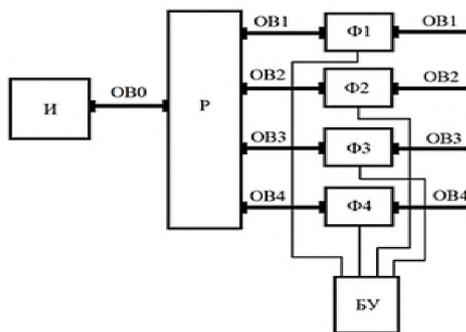
- а – датчик в рабочем состоянии;  
 б – датчик в сработавшем состоянии;  
 в – вид сбоку;  
 1 – оптическое волокно; 2 – корпус;  
 3 – замок; 4 – валообразный выступ

**Рисунок 6 – Чертеж пожарного датчика**



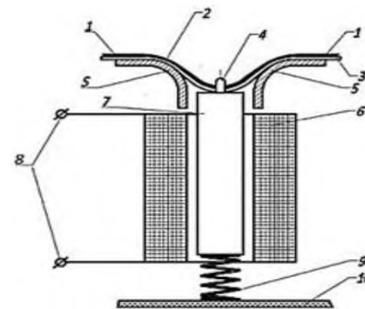
- 1 – источник импульсных сигналов света;  
 2, 3 – ОВ; 4 – биметаллическая пружина;  
 5 – фокусирующая линза;  
 6 – фотоприемник и детектор

**Рисунок 7 – Схема самовосстанавливающегося теплового датчика**



- Р – разветвитель;  
 И – источник оптического излучения;  
 ОВ0–ОВ4 – оптические волокна;  
 Ф1–Ф4 – формирователи макроизгиба;  
 БУ – блок управления

**Рисунок 8 – Структурная схема оптического переключателя**



- 1 – ОВ; 2 – участок оптического волокна с макроизгибом; 3 – фиксатор ОВ;  
 4 – крепление; 5 – направляющая планка макроизгиба ОВ; 6 – электрическая катушка;  
 7 – ферромагнитный стержень; 8 – клеммы магнитной катушки;  
 9 – пружина; 10 – опора

**Рисунок 9 – Схема формирователя макроизгиба для оптического переключателя**

Минимальное время переключения оптического переключателя 0,1 с. Характеристики оптических переключателей для разных оптических волокон и различных длин волн представлены в таблице 6.

Предложен волоконно-оптический ответвитель (рисунок 10). Возможности волоконно-оптического ответвителя: ответвление и снятие оптического сигнала с формируемого макроизгиба, регулировка коэффициента ответвления мощности оптического сигнала, определение наличия оптического излучения в ОВ, из которого ответвляется излучение, адаптация волоконно-оптического ответвителя для работы с различными типами ОВ, определение длины волны такого излучения и направления распространения оптического излучения в ОВ.

Таблица 6 – Характеристики оптического переключателя

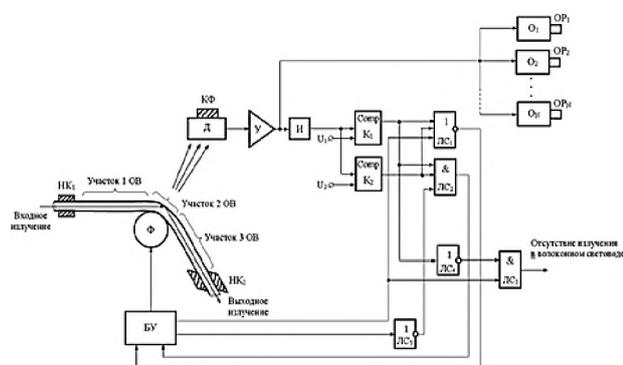
Оптическое волокно	Длина волны, нм	Радиус макроизгиба, мм	Ослабление мощности оптического излучения, дБ	Минимальное время переключения, с
G652	1310	2,0	80	0,1
	1490			
	1550			
	1625			
G655	1310	3,5	80	0,1
	1490			
	1550			
	1625			
G657	1625	2,0	80	0,1

Волоконно-оптический ответвитель может применяться как компонент телеметрической контролирующей системы при одновременном использовании двух длин волн, причем оптический сигнал на одной волне (1310 нм) служит для передачи информации, а другой оптический сигнал на другой длине волны (1625 нм) служит для контроля подключенных ВОД квазираспределенной системы (таблица 7).

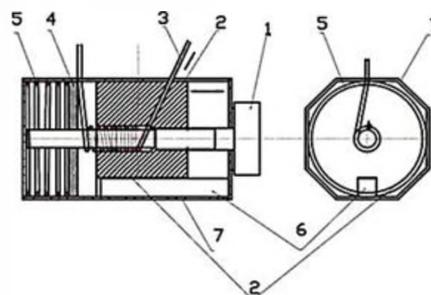
Таблица 7 – Характеристики волоконно-оптического ответвителя

Излучающее оптическое волокно	Рабочая длина волны, нм	Минимальный радиус макроизгиба $R_{min}$ , мм	Максимальный радиус макроизгиба $R_{max}$ , мм
G655	1310	2	4
	1625		

Предложена простая конструкция одномодового волоконно-оптического аттенюатора (рисунок 11). Определены основные характеристики этого аттенюатора – диапазоны рабочих длин волн и коэффициента затухания при использовании в нем оптических волокон G652 и G655 (таблица 8). При этом начальные оптические потери приведены для случая подключения аттенюатора к ОВ при помощи сварки.



**Рисунок 10 – Волоконно-оптический ответвитель.  
Принципиальная схема**



1 – винт; 2 – направляющая оптического волокна; 3 – ОВ; 4 – упор; 5 – пружина; 6 – штифт; 7 – корпус

**Рисунок 11 – Конструкция одномодового волоконно-оптического аттенюатора**

Таблица 8 – Характеристики одномодового волоконно-оптического аттенюатора

Марка оптического волокна	Длина волны оптического излучения, нм	Начальные оптические потери*, дБ	Динамический диапазон, дБ	Погрешность установки заданного затухания, %
G652	1310	$\geq 0,1$	0,1÷14	$\geq 10$
	1490		0,1÷72	
	1550		0,1÷81	
	1625		0,1÷120	
G655	1310	$\geq 0,1$	0,1÷42	$\geq 10$
	1490		0,1÷69	
	1550		0,1÷74	
	1625		0,1÷120	

Предложенный одномодовый аттенюатор может применяться в качестве узла системы определения угла поворота некоего вращающегося объекта за счет изменения мощности оптического излучения на выходе аттенюатора при повороте объекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Определены физические процессы затухания мощности оптического сигнала в оптическом волокне при формировании макроизгиба и факторы, такие как величина радиуса макроизгиба, длина дуги макроизгиба, длина волны оптического излучения, которые влияют на формирование потерь в оптическом волокне под внешним физическим воздействием и при возникновении макроизгиба. Установлено, что наибольшую восприимчивость к макроизгибу имеет оптическое волокно G655. Определена зависимость усиления затухания в оптическом волокне от увеличения длины дуги макроизгиба при постоянном радиусе. Предложен метод, заключающийся в обнаружении проникновения на охраняемый периметр, отличающийся использованием макроизгиба оптического волокна, с длиной волны 1625 нм и формированием радиуса макроизгиба оптического волокна 7,5 мм, позволяющего определять не только проникновение, а также и массу проникающего объекта в диапазоне до 250 кг. Разработаны конструкции волоконно-оптических датчиков массы и датчика проникновения на объект, основанные на регистрации макроизгиба оптического волокна, определены характеристики этих датчиков [1, 2, 4].

2. Получена зависимость величины амплитуды отклика отраженного сигнала от торца оптического волокна при макроизгибе на этом волокне от радиуса макроизгиба, от величины волны оптического излучения. Определены предельные наибольшие значения радиуса одного полного витка макроизгиба,

при котором отсутствует отраженный сигнал 2 мм. Предложен тепловой датчик, отличающийся от известных использованием макроизгиба оптического волокна и технологичностью, позволяющий осуществлять дистанционный контроль от 1 до 50 км [1, 3].

3. Определены зависимости ответвляемой мощности оптического излучения с макроизгиба оптического волокна в диапазоне радиусов от 2,5 до 10 мм и для длины волны оптического излучения от 1310 до 1625 нм, позволившие создать волоконно-оптический пожарный датчик с радиусом макроизгиба 3 мм, работающий на длине волны 1625 нм, отличающийся от существующих одновременным выполнением мониторинга температуры и задымления, а также обеспечивающий контроль целостности оптического волокна и обладающий функцией самовосстановления после восстановления исходных природных факторов, позволяющий его использовать в пожароопасных условиях. На данный пожарный датчик был зарегистрирован патент на изобретение [16].

4. Разработана методика определения количества оптоволоконных датчиков и минимального расстояния между двумя соседними амплитудными оптоволоконными датчиками на оптическом волокне, заключающаяся в регистрации затухания мощности оптического излучения, вносимого макроизгибами оптического волокна в точках воздействия квазираспределенного датчика в зависимости от радиуса макроизгиба, длины дуги макроизгиба, длины волны оптического излучения, позволяющая построить квазираспределенные системы на основе волоконно-оптических датчиков проникновения на объект в диапазоне длин волн от 1310 до 1625 нм [1, 3].

5. Разработана методика определения длины волны распространяющегося в оптическом волокне излучения, отличающаяся безразрывной технологией измерений этого волокна или отключения его от конечного получателя информации, заключающаяся в формировании двух макроизгибов (радиусом 2 и 9 мм) и отличающаяся измерением мощности излучения, снимаемого с боковой поверхности оптоволоконна в области макроизгибов, и позволяющая проводить измерения длины волны оптического излучения в диапазоне от 1310 до 1625 нм. Разработаны волоконно-оптические компоненты оптических систем: волоконно-оптическая система на основе макроизгиба для контроля за наличием постоянного электрического тока в проводниках, на который выдан патент на изобретение [4, 5, 15].

6. Предложена простая конструкция одномодового волоконно-оптического аттенюатора, отличающаяся от известных использованием макроизгиба оптического волокна и позволяющая определять затухание мощности оптического сигнала, передаваемого по волокну, от количества вит-

ков макроизгиба с использованием в нем оптических волокон G652 и G655. Определены основные характеристики этого аттенюатора – диапазоны рабочих длин волн и коэффициента затухания. Показано, что предложенный одномодовый аттенюатор может применяться в качестве узла системы определения угла поворота вращающегося объекта за счет изменения мощности оптического излучения на выходе аттенюатора при повороте объекта [5].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Применение разработанных методик и устройств позволило создать принципиально новое оборудование для регистрации внешних воздействий на оптоволокно. Волоконно-оптические датчики массы и датчика проникновения на объект, тепловой и пожарный датчики, волоконно-оптический переключатель, а также методика определения и расположения волоконно-оптических датчиков нашли применение в области мониторинга объекта в составе комплекса «Умный дом» и «Умный город».

Волоконно-оптический ответвитель может найти применение в системах волоконно-оптической связи как расширяющий функциональные возможности ответвителей за счет обеспечения регулировки коэффициента ответвления, а также адаптации волоконно-оптического ответвителя для работы с различными типами волоконно-оптических кабелей, для контроля параметров оптического излучения: наличия и направления передачи оптического излучения, длины волны оптического излучения.

Оптический переключатель нового типа на основе макроизгиба оптического волокна целесообразно использовать в волоконно-оптической системе на основе макроизгиба для контроля за наличием постоянного электрического тока в проводниках.

Волоконно-оптический аттенюатор может применяться для наладки, пуска, эксплуатации и профилактических измерений параметров волоконно-оптических линий связи, а также в измерительных приборах для таких линий. Данный аттенюатор может использоваться в качестве узла системы определения угла поворота некоего вращающегося объекта за счет изменения мощности оптического излучения на выходе аттенюатора при повороте объекта.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в настоящее время, что подтверждается актами внедрения в производство ОАО «ПРОМСВЯЗЬ» и СЗАО «БЕЛТЕЛЕКАБЕЛЬ» и актом внедрения в образовательный процесс учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» при разработке курсов лекций по дисциплине «Оптоволоконные информационные системы».

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в научных изданиях**

1. Волоконно-оптический мультидатчик / Т. М. Лукашик [и др.] // *Elmi əsərlər – Ученые записки – Scientific works / Азербайджан. техн. ун-т.* – 2019. – № 2. – С. 265–270.
2. Использование макроизгиба оптоволокну в качестве основы для создания датчика массы / Т. М. Лукашик [и др.] // *Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение.* – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 930–937.
3. Исследование характеристик мультидатчика на основе оптического волокна / Т. М. Лукашик [и др.] // *Докл. БГУИР.* – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 70–78.
4. Оценка возможности использования изгиба оптического волокна для перехвата информации / Т. М. Лукашик [и др.] // *Проблемы инфокоммуникаций.* – 2021. – №1 (13). – С. 10–16.
5. Способ диагностики параметров излучения в оптическом волокне при помощи макроизгиба / Т. М. Лукашик [и др.] // *Неразрушающий контроль и диагностика.* – 2023. – № 3. – С. 52–56.

### **Статьи в рецензируемых журналах**

6. Волоконно-оптический одномодовый аттенюатор на основе макроизгибов / Т. М. Лукашик [и др.] // *Веснік сувязі.* – 2019. – № 3. – С. 55–59.
7. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы создания волоконно-оптических датчиков / Т. М. Лукашик [и др.] // *Зв'язок.* – 2019. – № 1. – С. 40–44.
8. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна / Т. М. Лукашик [и др.] // *Веснік сувязі.* – 2020. – № 1. – С. 56–59.
9. Применение волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба в системах мониторинга безопасности объектов / Т. М. Лукашик [и др.] // *Веснік сувязі.* – 2020. – № 5. – С. 50–53.
10. Оптический переключатель на основе изгиба одномодового оптического волокна / Т. М. Лукашик [и др.] // *Вісник Університету «Україна». Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології.* – 2021. – № 2(02). – С. 29–41.

### **Материалы конференций**

11. Лукашик, Т. М. Влияние деформации оптопроводящего волокна на параметры сигнала в датчиках / Т. М. Лукашик // *Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XX науч.-*

техн. конф. аспирантов, студентов и молодых специалистов, Минск, 12–13 мая 2020 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 20–21.

12. Лукашик, Т. М. Пассивный волоконно-оптический датчик контроля массы / Т. М. Лукашик // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 окт. 2021 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 165–167.

13. Лукашик, Т. М. Макроизгиб оптического волокна как основа создания пассивных волоконно-оптических датчиков контроля / Т. М. Лукашик, Т. Г. Коваленко // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. аспирантов, студентов и молодых специалистов, Минск, 11–12 мая 2022 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 46–47.

14. Лукашик, Т. М. Виды волоконно оптических датчиков / Т. М. Лукашик, Т. Г. Коваленко // Современные средства связи : материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 окт. 2022 г. / Белорус. гос. акад. связи ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2022. – С. 201–203.

### **Патенты**

15. Волоконно-оптический ответвитель: пат. ВУ 23638 / А. О. Зеневич, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик, Т. М. Мансуров, Э. Т. Мансуров, Е. В. Новиков. – Оpubл. 28.02.2022.

16. Пожарный датчик: пат. ВУ № 23998 / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик, Е. В. Новиков. – Оpubл. 30.04.2023.

## РЭЗІЮМЭ

Лукашык Таццяна Міхайлаўна

### Датчыкі на аснове макравыгібу аптычнага валакна для кантролю параметраў навакольнага асяроддзя, аб'ектаў і вырабаў

**Ключавыя словы:** аптычнае валакно, валаконна-аптычны датчык, макравыгіб, аптычнае выпраменьванне, квазіразгуртаваны датчык, датчык, аптычны перамыкач, пажарны датчык, атэнюатар

**Мэта працы:** распрацоўка і стварэнні кампанентаў квазіразгуртаваных валаконна-аптычных сістэм на аснове макравыгібаў аптычнага валакна, якія працуюць на выяўленне месца і колькасці макравыгібаў.

**Метады даследавання:** метады неразбуральнага (ўносяцца страты) вымярэння; метады зваротнага рассеявання (метады аптычнай рэфлектаметрыі).

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацавана метадыка вызначэння колькасці і размяшчэння валаконна-аптычных датчыкаў, якая дазваляе ствараць квазіразгуртаваную сістэму і якая рэалізуецца ў дыяпазоне даўжынь хваль ад 1310 да 1625 нм, прызначаная для кантролю параметраў навакольнага асяроддзя і аб'ектаў з дапамогай распрацаваных самааднаўляльных датчыкаў пранікнення, цеплавых і пажарных, якая дазваляе ствараць перыметры кантролю на адлегласцях працягласцю да 50 км; прапанаваны валаконна-аптычны адшчапіцель, які дазваляе кантраляваць параметры аптычнага выпраменьвання і адаптаваць для працы розныя тыпы аптычных валокнаў; прапанаваны валаконна-аптычны аднамодавы атэнюатар, які дазваляе вызначаць згасанне магутнасці аптычнага сігналу, перадаванага па валакне, і вызначаць вугал зварота аб'екта; аптычны перамыкач новага тыпу на аснове макравыгібу ОВ, які дазваляе ажыццяўляць кантроль за наяўнасцю пастаяннага электрычнага току ў сетках.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** у прамысловасці, у сферы жыллёва-камунальнай гаспадаркі, на ахоўных тэрыторыях, у валаконна-аптычных сістэмах перадачы інфармацыі.

**Вобласць ужывання:** сістэмы пажарнай сігналізацыі, сістэмы аховы перыметраў, оптавалакновыя сістэмы перадачы інфармацыі.

## РЕЗЮМЕ

Лукашик Татьяна Михайловна

### Датчики на основе макроизгиба оптического волокна для контроля параметров окружающей среды, объектов и изделий

**Ключевые слова:** оптическое волокно, волоконно-оптический датчик, макроизгиб, оптическое излучение, квазираспределенный датчик, оптический переключатель, пожарный датчик, аттенюатор

**Цель работы:** разработка и создание компонентов квазираспределенных волоконно-оптических систем на основе макроизгибов оптического волокна, работающих на выявление места и количества макроизгибов.

**Методы исследования:** метод неразрушающего (вносимые потери) измерения; метод обратного рассеяния (метод оптической рефлектометрии).

**Полученные результаты и их новизна:** разработана методика определения количества и расположения волоконно-оптических датчиков, позволяющая создавать квазираспределенную систему и реализуемая в диапазоне длин волн от 1310 до 1625 нм, предназначенная для контроля параметров окружающей среды и объектов с помощью разработанных самовосстанавливающихся датчиков проникновения, тепловых и пожарных, позволяющая создавать периметры контроля на расстояниях протяженностью до 50 км; предложен волоконно-оптический ответвитель, отличающийся от существующих расширенными функциональными возможностями и позволяющий контролировать параметры оптического излучения и адаптировать для работы различные типы оптических волокон; предложен волоконно-оптический одномодовый аттенюатор, позволяющий определять затухание мощности оптического сигнала, передаваемого по волокну, и определять угол поворота контролируемого объекта; оптический переключатель нового типа на основе макроизгиба ОВ, позволяющего осуществлять контроль за наличием постоянного электрического тока в сетях.

**Рекомендации по использованию:** в промышленности, в сфере жилищно-коммунального хозяйства, на охраняемых территориях, в волоконно-оптических системах передачи информации.

**Область применения:** системы пожарной сигнализации, системы охраны периметров, оптоволоконные системы передачи информации.

## SUMMARY

Lukashik Tatiana Mikhailovna

### **Sensors based on macro-bending optical fiber for monitoring environmental parameters, objects and products**

**Keywords:** optical fiber, fiber-optic sensor, macro bend, optical radiation, reflectometer, quasi-distributed sensor, sensor, optical switch, fire sensor, attenuator

**Purpose of the work:** The purpose of the work is to develop and create components of quasi-distributed fiber optic systems based on macro-bends of optical fiber, working to identify the location and number of macro-bends and to create passive self-healing fiber optic sensors based on these systems.

**Research methods:** non-destructive (insertion loss) measurement method; backscattering method (optical reflectometry method).

**The results obtained and their novelty:** the method has been developed for determining the number and location of fiber-optic sensors, which allows creating a quasi-distributed system and is implemented in the wavelength range from 1310 to 1625 nm, designed to control environmental parameters and objects using self-healing penetration sensors, thermal and fire sensors, which allows creating control perimeters at distances up to 50 km; a fiber-optical coupler that differs from the existing ones in advanced functionality and allows you to control the parameters of optical radiation and adapt to work with various types of optical fibers; a fiber-optic single-mode attenuator is proposed that allows you to determine the attenuation of the power of the optical signal transmitted over the fiber and determine the angle of rotation of the controlled object; an optical switch of a new type based on a macro bend that allows monitoring the presence of direct electric current in networks.

**Recommendations for use:** in industry, in the field of housing and communal services, in protected areas, in optical information transmission systems.

**Scope of application:** fire alarm systems, perimeter security systems, fiber-optic information transmission systems.



**Лукашик**  
Татьяна Михайловна

**ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ МАКРОИЗГИБА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ,  
ОБЪЕКТОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

Подписано в печать 15.11.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,40. Уч.- изд. л. 1,50. Тираж 60 экз. Заказ № 866.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

## ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в тексте автореферата диссертации Лукашик Т.М. «Датчики на основе макроизгиба оптического волокна для контроля параметров окружающей среды, объектов и изделий»

№ стр	Написано	Следует читать
15	<b>Основные научные результаты диссертации</b> п.3 Определены зависимости ... патент на изобретение [16]	<b>Основные научные результаты диссертации</b> п.3 Определены зависимости ... патент на изобретение [4, 5, 16]
17	<b>СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ</b> <b>Статьи в научных изданиях</b> 1. Волоконно-оптический мультидатчик / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 2. Использование макроизгиба ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 3. Исследование характеристик ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 4. Оценка возможности ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 5. Способ диагностики ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... <b>Статьи в рецензируемых журналах</b> 6. Волоконно-оптический ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 7. Исследование характеристик ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 8. Датчик обнаружения ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 9. Применение волоконно-оптических ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ... 10. Оптический переключатель ... / Т. М. Лукашик [и др.] // ...	<b>СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ</b> <b>Статьи в научных изданиях</b> 1. Волоконно-оптический мультидатчик / Г. В. Василевский, С. В. Жданович, Т. М. Мансуров, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик // ... 2. Использование макроизгиба ... / Г. В. Василевский, А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Т. М. Лукашик, А. А. Лагутик // ... 3. Исследование характеристик ... / А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик, Т. Г. Коваленко, Т. М. Лукашик // ... 4. Оценка возможности ... / А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик // ... 5. Способ диагностики ... / А. О. Зеневич, Т. М. Мансуров, Е. В. Новиков, Т. М. Лукашик, Т. А. Матковская // ... <b>Статьи в рецензируемых журналах</b> 6. Волоконно-оптический ... / Г. В. Василевский, Е. В. Новиков, Т. М. Лукашик, А. А. Лагутик // ... 7. Исследование характеристик ... / Г. В. Василевский, А. О. Зеневич, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик, Е. В. Новиков // ... 8. Датчик обнаружения ... / Т. М. Лукашик, Е. В. Новиков, С. В. Жданович, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик // ... 9. Применение волоконно-оптических ... / А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. М. Солиев, С. В. Жданович, Т. М. Лукашик, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик // ... 10. Оптический переключатель ... / А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Т. Г. Коваленко, Т. М. Лукашик, Т. М. Мансуров // ...

Соискатель

Т.М. Лукашик

Ученый секретарь совета по защите кандидатских диссертаций Д 02.18.02  
к.т.н., доцент

С. В. Болотов