

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Алькина Алия Даулетхановна

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ ПО ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ  
ПОТЕРЯМ МОЩНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий веществ и природной среды

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

**Научный руководитель:**

**Юрченко Алексей Васильевич**

доктор технических наук, профессор  
Исследовательской школы физики  
высокоэнергетических процессов ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет» г. Томск.

**Официальные оппоненты:**

**Коношонкин Александр Владимирович**

доктор физико-математических наук, ведущий  
научный сотрудник лаборатории рассеяния  
электромагнитных волн, ФГБУН Институт  
оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г.  
Томск.

**Кистенев Юрий Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заместитель проректора по научной и  
инновационной деятельности ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский  
государственный университет» г. Томск.

Защита состоится 16 апреля 2024 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ марта 2024г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.13  
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсивное развитие волоконно-оптической техники позволило практически полностью заменить медные пары на оптические проводники, но при всех их достоинствах имеется и ряд нерешенных проблем. Операторам связи крайне необходимо иметь средства централизованного контроля за техническим состоянием внутризонных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) для быстрого реагирования при их повреждении, а также обеспечить защиту передаваемой информации от несанкционированного доступа. Остается нерешенным вопрос автоматического оповещения при повреждении волоконно-оптического кабеля (ВОК) и точного определения места его повреждения. Разработка аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния кабелей (АПКТК) весьма актуальна для внутризонных систем телекоммуникаций, так как в настоящий момент времени нет интеллектуальной системы, способной в режиме реального времени контролировать повреждение или снижение пропускной способности ВОК. Также не решен в полной мере вопрос охраны ВОК и их защиты от несанкционированного доступа. Предлагается принципиально новая система контроля, основанная на оптико-цифровом интеллектуальном контроле дополнительных потерь и оптического рассеяния, возникающих в ВОК при механических воздействиях, растяжениях или изгибах. АПКТК способен не только определить параметры затухания сигнала, но и точное место повреждения ВОК. Контроль целостности самого ВОК и точек его коммутации является весьма важным для быстрого реагирования на возникающие проблемы с передачей информации. Соответственно возникает естественная необходимость или потребность в разработке новых методов и средств контроля технического состояния оптических кабелей. Для решения проблем повышения качества предоставления услуг связи и обеспечения информационной безопасности необходимы надежные в эксплуатации, а также не требующие значительных материальных затрат автоматические цифровые средства контроля, которые способны использовать резервные волокна ВОК. В отличие от традиционных осмотров и инструментальных наблюдений, АПКТК позволит повысить эффективность контроля технического состояния ВОК в круглосуточном режиме, а также вести охрану протяженного объекта одновременно. Работа направлена на решение важной производственной задачи, связанной с повышением уровня контроля технического состояния ВОК национального оператора связи АО «Казахтелеком». Предлагаемый метод основан на возникающем фотоупругом эффекте, сформировавшемся при внешнем силовом воздействии на оптическое волокно (ОВ) с последующим оптико-цифровым анализом параметров оптической волны и уровня рассеяния

Рэля. Разработанный АПКТК имеет в своей основе многоканальный оптико-цифровой блок предварительной обработки и интеллектуальное программное обеспечение. В качестве чувствительного элемента используются резервные ОВ действующего ВОК. Актуальность работы обосновывается необходимостью контроля дополнительных потерь, возникающих в оптических кабелях при механических воздействиях на них для оценки их технического состояния в режиме реального времени.

**Степень разработанности темы исследования.** Проведенный анализ научной литературы показал, что в России есть разработки, направленные на совершенствование волоконно-оптических технологий и датчиков. В разное время изучением свойств оптических волокон занимались российские ученые: Бурде В.А., Сыркин В. Г., Куликов А.В., Дмитриев С.А., Кульчин Ю.Н., Бондаренко О.В., Лиокумович Л.Б., Томышев К. А. и др. Множество работ зарубежных ученых США и Западной Европы с начала XXI века посвящены дальнейшему совершенствованию систем передачи информации, мониторинга, контроля и технической диагностики ВОК. Проблема эффективного контроля технического состояния кабелей внутризоновых сетей телекоммуникации в настоящий момент не решена в полном объеме, что определяет актуальность диссертационной работы.

**Цель работы** - разработка аппаратно-программного комплекса контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности и уровню рассеяния оптического излучения Рэля, при механических воздействиях на оптическое волокно, для повышения надежности и безопасности эксплуатации систем телекоммуникации.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

- разработать физико-математическую модель оптических процессов в одномодовом волокне при его деформациях и выполнить компьютерное моделирование внешнего силового воздействия на ВОК;
- разработать аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния дополнительных потерь (АПКТК) и рассеяния оптического излучения Рэля;
- выполнить экспериментальные исследования опытного образца аппаратно-программного комплекса;
- разработать методику контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям на основе оптико-цифрового анализа параметров оптического излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна.

**Объектом исследования** является аппаратно-программный комплекс контроля дополнительных оптических потерь и Рэлеевского рассеяния, возникающих в оптических кабелях при внешних механических воздействиях.

**Предметом исследования** являются: методика исследований, закономерности, аппаратно-программное решение, параметры дополнительных потерь и рассеяния оптического излучения Рэлея, оптические процессы возникающих в оптических кабелях при механических воздействиях.

#### **Научная новизна**

1) Разработана физико-математическая модель учитывающая изменения интенсивности оптического излучения и его объемной плотности электромагнитного поля волны в оптическом волокне при его деформации.

2) Предложена и исследована методика контроля дополнительных потерь возникающих в оптическом волокне при его деформации и повреждении, которая основана на оптико-цифровом анализе изменения параметров оптического излучения, с преобразованием в картину пикселей, сформированных на поверхности фотоматрицы, установленной на торце оптоволоконного кабеля, защищена патентами РК 6862 и 7775.

3) Получены научно обоснованные результаты исследований дополнительных потерь, возникающих в оболочке ОВ в зависимости от параметров микроизгиба ОВ, которые позволяют контролировать техническое состояние кабеля и несанкционированный доступ при помощи оптико-цифрового анализа интенсивности оптического излучения.

4) Разработан алгоритм функционирования многоканального аппаратно-программного комплекса контроля дополнительных потерь, возникающих в оптических кабелях при механических воздействиях с помощью двух типов датчиков, квази-распределенного, работающего на длине волны 650 нм и распределенного, работающего на длине волны 1310 или 1550 нм, что позволяет установить место повреждения ОВ с точностью до 1 м.

5) Разработаны лабораторный и экспериментальный образцы для исследования процессов изменения свойств оптического излучения в оптическом волокне при его деформации и повреждении, с помощью оптико-цифрового анализа картины пикселей, защищены патентами РК 6862 и 7775.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в использовании новых теоретических основ контроля дополнительных потерь и рассеяния оптического излучения конденсированными средами по методу Рэлея, возникающих в оптических кабелях при механическом воздействии на них. Практическая значимость заключается в разработке опытного образца аппаратно-программного комплекса для контроля дополнительных потерь оптических кабелей систем телекоммуникации. Образец прошел практическую апробацию в АО «Казахтелеком» и филиале АО «КТЖ - Грузовые» - Карагандинское ГП» (получено 2 акта

внедрения). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет им. А. Сагинова». Практическая значимость заключается в использовании полученных закономерностей для оценки потерь на кабеле при его эксплуатации. Разработанный алгоритм автоматизированного многовариантного расчета позволяет установить параметры дополнительных потерь, возникающие в ОВ типа G-652, находящегося в защитной оболочке, что является более объективным показателем при реальных условиях эксплуатации. Контроль потерь в волоконно-оптических кабелях позволяет предотвратить несанкционированный доступ к информации.

**Методология и методы исследования:** анализ и обобщение литературы, научных статей и патентов по теме исследования; методика контроля оптических потерь при микроизгибе ОВ и возникновении фотоупругого эффекта; системный подход и анализ технического состояния ВОК; метод оптико-цифрового анализа светового пятна, сформированного на поверхности фотоматрицы; использование закона распределения Гаусса, интерференции световых волн, их дифракции и изменения интенсивности пятен Пуассона при возникновении фотоупругого эффекта. Используются основные законы физики из раздела оптики и методы теоретического исследования, а также выполнено 3D моделирование с применением программ COMSOL и ANSYS. Для обработки экспериментальных данных были использованы программы Wolframalpha и ANETR. Применялись методы теоретического и эмпирического исследования, а также методы для цифровой обработки видео изображений и оптико-электронного анализа. Для контроля уровня рассеяния оптического излучения использован метод Релея.

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

1. Физико-математическая модель позволяет установить изменение параметров дополнительных потерь, сформированных в оболочке оптического волокна при его микроизгибе, а также установить зависимость изменения интенсивности оптической волны, падающей на поверхность много пиксельного фотоприемника в зависимости от величины микроизгиба оптического волокна.

2. Методика контроля технического состояния оптических кабелей основана на установлении численного значения дополнительных потерь, сформированных в оболочке ОВ при его микроизгибе, прямо пропорционально воздействующей силе на ВОД, а также изменению численной картины пикселей и перехода их из черного цвета в белый, что дает возможность контролировать не только техническое состояние оптического кабеля, но и идентифицировать попытку нарушения его целостности.

3. Аппаратно-программный комплекс контроля потерь в ОВ при механических воздействиях позволяет контролировать техническое состояние телекоммуникационных кабелей за счет оптико-цифрового анализа дополнительных потерь, уровня рассеяния и интенсивности оптического излучения, сформированного на поверхности фотоприемника высокого разрешения.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивалась общенаучными методами сбора первичной информации с анализом материалов предыдущих исследований, размещенных в наукоемких базах данных. Достоверность обеспечена путем обработки данных с последующим сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также достаточным объемом проведенных лабораторных и стендовых испытаний; положительными результатами апробации разработанной методики контроля в производственных условиях.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на 14 международных научно-практических конференциях, проходивших на территории России и зарубежных стран. Результаты исследования были доложены на заседании технической службы в АО «Казахтелеком», АО «Арселор Миттал Темиртау» и ТОО «Транстелеком», НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

**Личный вклад автора** заключается в самостоятельном проведении следующих этапов: постановка цели и задач; выполнение научного анализа литературы, разработка физико-математической и 3D моделей; разработка образца АПКТК; проведение теоретических и эмпирических исследований с последующей статистической обработкой полученных данных; формирование выводов и положений, выносимых на защиту, подготовка научных статей и патентов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи и 8 докладов **в изданиях, входящих в международную базу данных SCOPUS и Web of Science**, среди которых есть статья уровня Q1. По теме диссертации представлено 6 докладов на международных научных конференциях и опубликована 1 статья в зарубежном научном журнале. Новизна разработок подтверждается 2 зарубежными патентами.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 199 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 6 таблиц и 13 приложений на 67 страницах. Список использованной литературы составляет 218 наименований.

## Содержание работы

**Введение** включает актуальность исследования, проведенного в рамках диссертационной работы. Выполнена постановка цели, задачи научной новизны и практической значимости. Во введении сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена научному анализу развития волоконно-оптических датчиков в странах западной Европы и США, а также разработок ученых России на основании литературного обзора. Выполнен литературный обзор 105 различных статей, в том числе входящих в наукоёмкие базы данных РИНЦ, SCOPUS и Web of Science, а также выполнен патентный поиск для исключения дублирования научных исследований и повышения достоверности ожидаемых результатов. На основе первичных данных сформулирована научная проблема и определены пути ее решения. В главе представлены описание методологии и план проведения исследования. Сформулированы основные гипотезы по построению АПКТК и взаимодействию с распределенным волоконно-оптическим датчиком, которым является ВОК. Рассмотрены процессы распространения световых волн видимого и невидимого диапазона, формирования пятен на поверхности фотоматрицы и влияния внешних помех на работу АПКТК. Определены теоретические и эмпирические этапы исследования. Сделан выбор среды моделирования процессов распространения световых волн в ОБ при механическом воздействии на них. Моделирование реализовано при помощи метода конечных элементов, с использованием численного исследования и пакетов программ AutoCAD, Matlab, ANSYS и COMSOL Multiphysics.

**Вторая глава.** Представлена физико-математическая модель процессов распространения световой волны по сердцевине ОБ с учетом всех деформаций ОБ в широком диапазоне параметров волн (интенсивность, частота волны и др.) и температур, а также выходом части оптической мощности в оболочку. Световое пятно можно отнести к известному пятну Пуассона. При внешнем силовом воздействии на ОБ параметры пятна изменяются и в первую очередь меняется интенсивность.

$$P_{Vi}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) = 2\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_\infty} I \approx 2\omega \frac{n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)}{c} I \Delta. \quad (1)$$

Расчетная величина  $n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)$ .  $\zeta_0$  является параметром, представляющим множество различных характеристических молекулярных параметров активации релаксаторов на ионно-молекулярных химических связях; частоты собственных колебаний ионов вблизи положения равновесия. Отклонение параметров лазера  $\Delta$ . Показатель преломления вещества ОБ представлен как

$$n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0).$$



На показатель преломления влияют геометрические характеристики кристаллической структуры ОВ и оптико-геометрические параметры, которыми являются угол падения луча на поверхность материала  $\theta$  и угол  $\alpha_0$  между волновым вектором, преломленным в ОВ, и вектором нормали к поверхности фотоприемника. Произведем усреднение по углам  $\alpha_0$  функции (1)

$$\langle P_{Vi}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle = \frac{\omega}{c\pi} \int_0^\pi I(\alpha_0) n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0 \Delta. \quad (2)$$

Распределение интенсивности световой волны по углам  $\alpha$  между вектором нормали к поверхности фотоприемника. Фотоприемник можно представить как круглый светочувствительный элемент с радиусом  $R$ , который располагается перпендикулярно по отношению к оси ОВ. У ОВ имеется внутренний радиус сердцевины и внешний радиус оболочки. ОВ имеет форму цилиндра с  $r_1$  и  $r_2$ .

$$I(\alpha_0) = I_0(r) \times \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2, \quad (3)$$

По направлению нормали к фотоприемнику достигается максимальная интенсивность  $I_0(r)$ .

$$I_{02}(r) = I_0(0) \times \left[ \exp(-Lr) + \exp(-Br_2) + \frac{1}{Ar_1} - \exp(-Br_1) - \exp(-Lr_2) \right], \quad I_0(0) = I_{\text{exp}} = \frac{W}{S},$$

где  $W$  – мощность светового потока (определяемая характеристиками источника излучения на данной длине волны),

$$S = \pi r_1^2; \quad A \approx 1,25 \cdot \frac{1}{r_1}; \quad B \approx \sqrt{\frac{n_{\infty 1}}{n_{\infty 0}}} \cdot \frac{1}{r_1}; \quad L \approx \sqrt{\frac{1}{n_{\infty 1}}} \cdot \frac{1}{r_2};$$

$n_{\infty 0}, n_{\infty 1}$  – показатель преломления материала внутреннего (центрального), внешнего слоя оптоволоконного элемента.

Распределение объемной плотности мощности электромагнитного поля волны в ОВ при условии, что в расположенном вдоль оси горизонтальном деформируемом ВОК имеется угол  $\alpha_0$ , который формируется при падении световой волны на поверхность фотоприемника, установленного на торце ОВ, подвергающегося деформации, при этом будет потеря оптической мощности, передаваемой по волокну, так как формируется микроизгиб и возникают дополнительные потери. Деформацию ВОК можно контролировать по потерям мощности. При отсутствии деформации ВОК и ОВ

$$P_{Vi}(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) d\alpha_0 \Delta.$$

При деформации ВОК и ОВ

$$P_{Vi}(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left( \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) d\alpha_0 \Delta.$$

Далее представлены результаты компьютерного моделирования процессов деформации и распространения световой волны в ОБ с использованием программ ANSYS и COMSOL (рисунок 1).

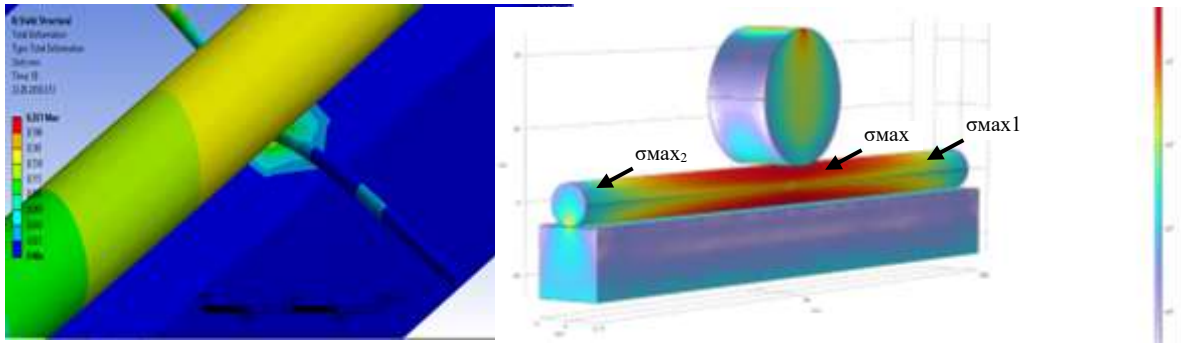
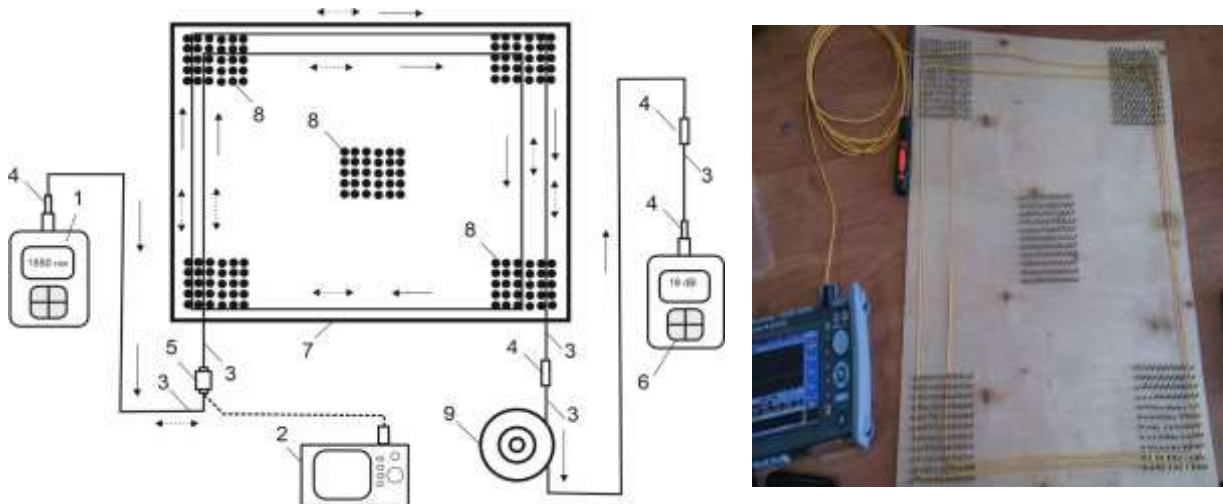


Рисунок 1 – Компьютерная модель

Проведены исследования дополнительных потерь в оптических кабелях при различных вариантах изгиба и длин оптического излучения. Установлена зависимость потерь от длины волны и параметров радиуса изгиба ОБ и ВОК. Для проведения практических опытов был разработан лабораторный стенд, представленный на рисунке 2. Результаты исследования дополнительных потерь при микроизгибе ОБ представлены на рисунке 3.



1 - источник оптического излучения; 2 - оптический рефлектометр; 3 – патч-корд; 4 - оптический коннектор; 5 – оптический разветвитель; 6 - измеритель оптической мощности; 7 – основание стенда; 8 - области намотки ОБ на направляющие; 9 – компенсационная катушка

Рисунок 2 – Общий вид рефлектометра и стенда

Для измерения потерь в ОБ при множественных изгибах использовался оптический рефлектометр Yokogawa AQ1200E (Япония)

стандарта Optical Time Domain Reflectometer (OTDR). С использованием лабораторного стенда были проведены эмпирические исследования и получены данные о дополнительных потерях, возникающих в одномодовом ОВ стандарта G-652 длиной 10 метров, с размерами сердцевины и оболочки 9/125 мкм. Используются три длины волны оптического излучения 1310, 1550 и 1625 нм. Полученные данные обработаны при помощи компьютерной программы, выполняющей автоматическую аппроксимацию результатов. Используя результаты натурных исследований, было разработано программное обеспечение для автоматического расчета потери оптической мощности в ОВ при множественных изгибах при различных длинах волны. Программа представляет из себя сайт, который был разработан на HTML, CSS и JavaScript, использовались готовые решения, такие как Bootstrap, библиотека для работы с графиками Plotly (рисунок 4). По результатам экспериментов была разработана компьютерная программа для автоматизированного расчета оптических потерь.

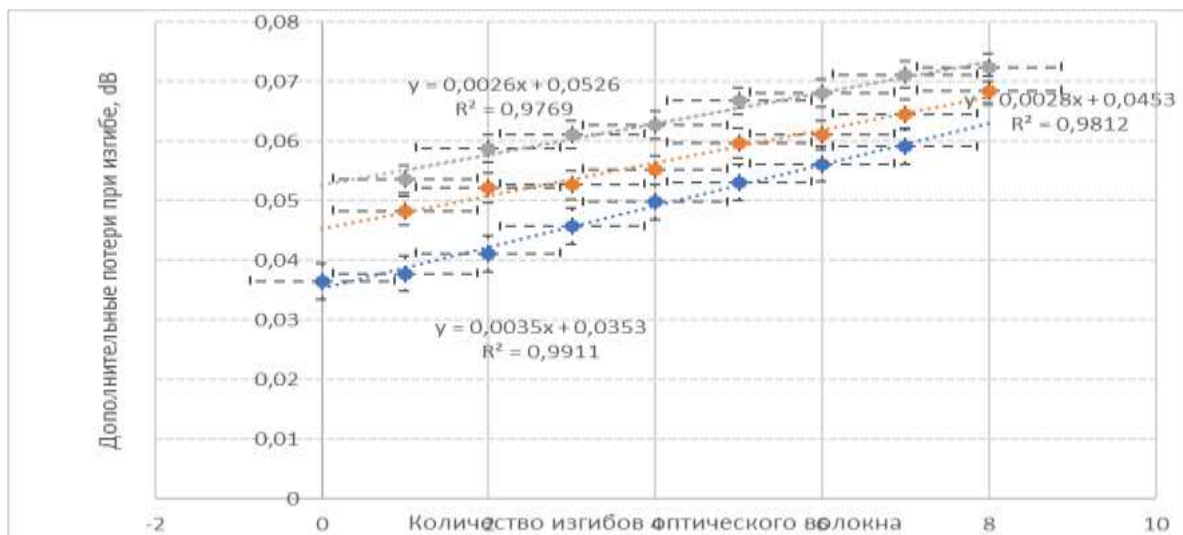


Рисунок 3 – Зависимость роста потерь при увеличении количества изгибов ОВ

При вводе табличных данных имеются следующие кнопки: длина волны, где для выбора предоставлены значения для трех длин волн: 1310,1550,1625 нм; для значений углов изгиба: 45, 90, 135 град; показатель углов изгиба: 0 - 7; линейная аппроксимация ( $R^2$ ). Программа использует данные, полученные в результате проведения эмпирических исследований, и автоматически строит аппроксимации, а также проводит регрессионный анализ результатов. По введенным данным строится модель линейной регрессии для аппроксимации функции.

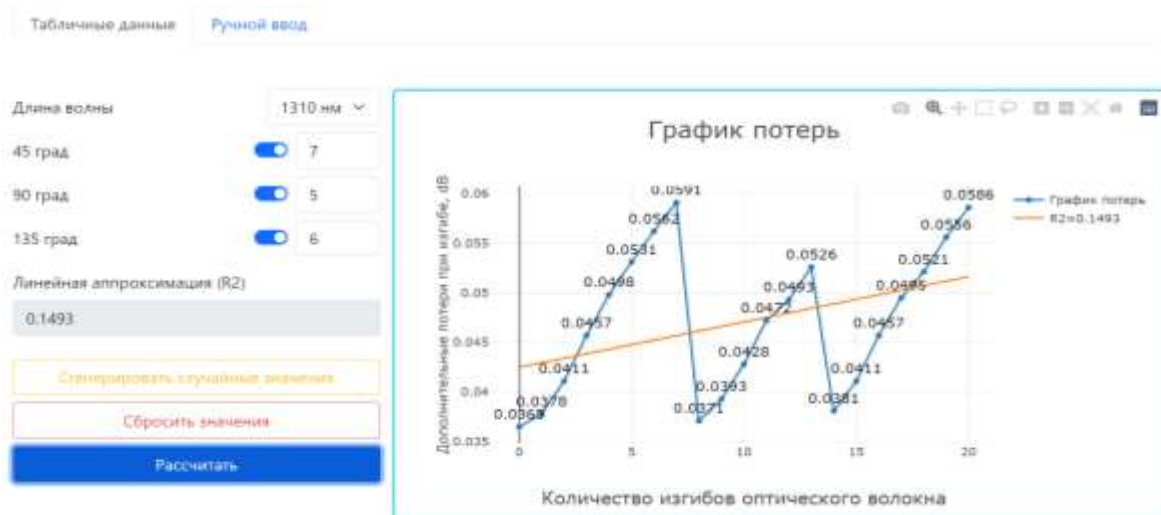


Рисунок 4 – Общий вид интерфейса при вводе табличных данных

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований с использованием действующего образца АПКТК с распределенным волоконно-оптическим кабелем. На рисунке 5 показаны фото лабораторного стенда и действующего образца АПКТК.



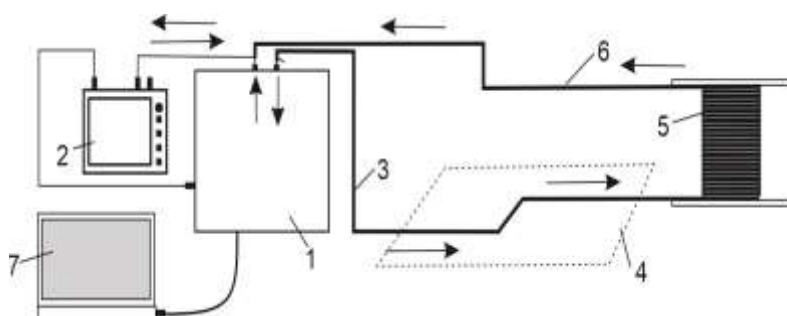
Рисунок 5 - Действующий образец АПКТК

Для установления точного места несанкционированного доступа или повреждения ВОК используется метод оптической рефлектометрии.

Испытания образца АПКТК показали достаточно высокую надежность срабатывания при воздействии на ВОК. Значение вероятности срабатывания составило 0,81. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 19%. В дальнейшем будет повышена вероятность срабатывания до 0,9, при снижении вероятности ложного срабатывания до 0,1. Предложенная методика позволяет контролировать механическое воздействие на волоконно-оптический кабель по изменению уровня интенсивности световой волны, падающей на поверхность фотоприемника, а программная обработка с оптоэлектронным анализом изображения пятна

позволяет отслеживать изменения интенсивности отдельных пикселей в каждом секторе светового пятна.

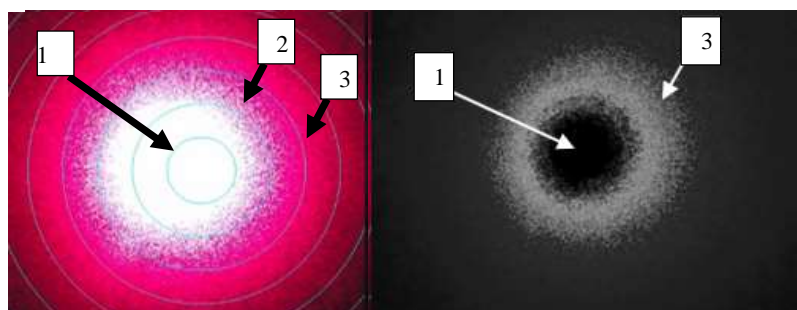
На рисунке 6 представлена схема разработанного лабораторного образца для проведения исследований.



1- блок предварительной обработки данных; 2 – оптический рефлектометр; 3 - волоконно-оптический кабель (обратное направление); 4 - основание; 5 - катушка; 6 - волоконно-оптический кабель (прямое направление); 7 – персональный компьютер

Рисунок 6 - Структурная схема лабораторного образца

Нужно отметить, что падающий свет на поверхность телевизионной матрицы содержит значительное количество шумов (рисунок 7), для снижения помех необходимо снизить шум и пульсацию источника излучения, который должен быть когерентным.

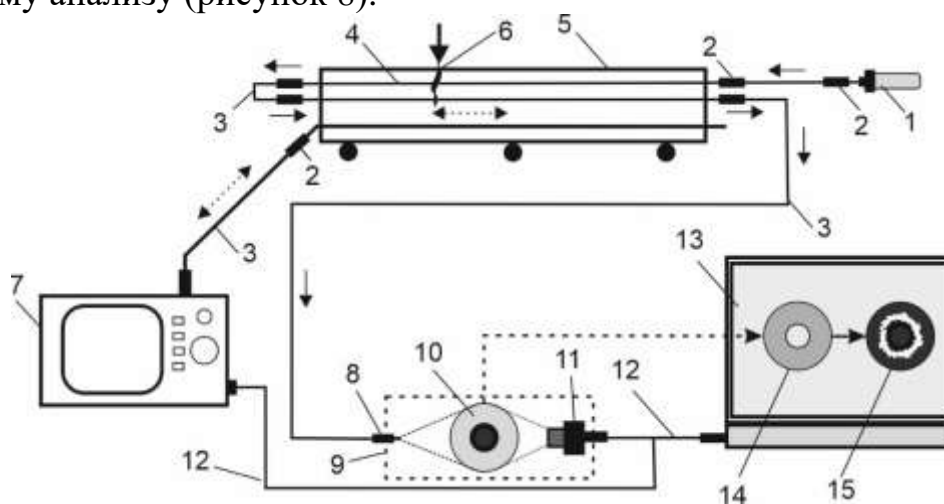


1 – интенсивность излучения сердцевин; 2 – интенсивность излучения границы раздела между сердцевинной и оболочкой, зона формирования шума; 3 – интенсивность излучения оболочки.

Рисунок 7 - Форма светового пятна

Позитив не используется, так как потери распространяются по оболочке, и она в позитивном изображении более тусклая. Сердцевина, напротив, более яркая, но не информативная, соответственно в негативе более яркая оболочка. Методика основана на контроле дополнительных потерь, формируемых в оболочке. Лазер должен быть когерентным с отклонением длины волны не более 5 нм. Теоретически длина волны может быть от 650 до 1550 нм. Чем больше длина, тем меньше затухание в оптическом волокне, что необходимо учитывать при увеличении длины

волны волоконно-оптического датчика. Лазер установлен с одной стороны ОВ, а фотоприемник - с другой. Роль фотоприемника на выходе оптического волокна выполняет фотоэлектрическая матрица КМОП (CMOS) с графическим процессором измерительного канала для предварительной обработки сигналов высокого разрешения. Если на ОВ оказывается механическое или виброакустическое воздействие, это вызывает изменение свойств световой волны, распространяющейся по сердцевине, что фиксируется фотоприемником высокого разрешения. Далее система обработки данных и принятия решений выдает сигнал тревоги или игнорирует зафиксированные изменения и распознает случайные помехи. При механическом воздействии на волоконно-оптический датчик изменяется пиксельная картина светового пятна. Программа преобразовывает все изменения интенсивности светового пятна и возрастающие дополнительные потери в картину изменения пикселей. Отличием от известных методов оптической интерферометрии и рефлектометрии является то, что излучение падает не на одиночный пиксель фотодиода, который измеряет изменение интенсивности, а на поверхность многопиксельной фотоматрицы высокого разрешения, которая уже воссоздаёт изображение светового пятна, а программная часть формирует негативное изображение, которое подвергается оптико-цифровому анализу (рисунок 8).



1 – источник излучения (полупроводниковый лазер 650 нм); 2 – оптический коннектор; 3 – оптический патч-корд; 4 – ОВ (ВОД); 5 – ВОК; 6 – участок на котором ВОК подвергается механическому воздействию; 7 – оптический рефлектометр; 8 – опоры для воздействия на балку; 9 – оптический модуль; 10 – световое пятно; 11 – фотоматрица с графическим микропроцессором; 12 – USB кабель; 13 – персональный компьютер; 14 – негатив светового пятна; 15 – результат анализа параметров светового пятна и картина пикселей.

Рисунке 8 – Поясняющая условная схема

На рисунке 9 показан снимок с экрана компьютера, на котором приведены несколько вариантов изменения картины пикселей светового пятна и их перехода от черного к белому свету. На экране компьютера четко видно, как изменяется световое пятно, особенно на границе раздела ядра и оболочки оптического волокна, наблюдается рост белых пикселей при увеличении силы воздействия на ВОК. Чем сильнее воздействие на волоконно-оптический датчик, тем больше изменение интенсивности светового пятна и больше возникающие дополнительные потери, распространяющиеся по оболочке волоконно-оптического датчика, соответственно большее количество белых пикселей.



Рисунок 9 - Снимок с экрана компьютера

Исследования лабораторного образца контроля технического состояния оптических кабелей с использованием методом контроля дополнительных потерь мощности являются достаточно эффективными, а аппаратная часть достаточно простой по комплектующим деталям, что обеспечит доступную стоимость АПКТК для потребителей.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки АПКТК, изложены основы предложенного метода интеллектуального пиксельного анализа светового пятна и определения дополнительных потерь в ОВ, а также метод контроля Рэлеевского рассеяния. На рисунке 10 показан один из вариантов работы АПКТК.

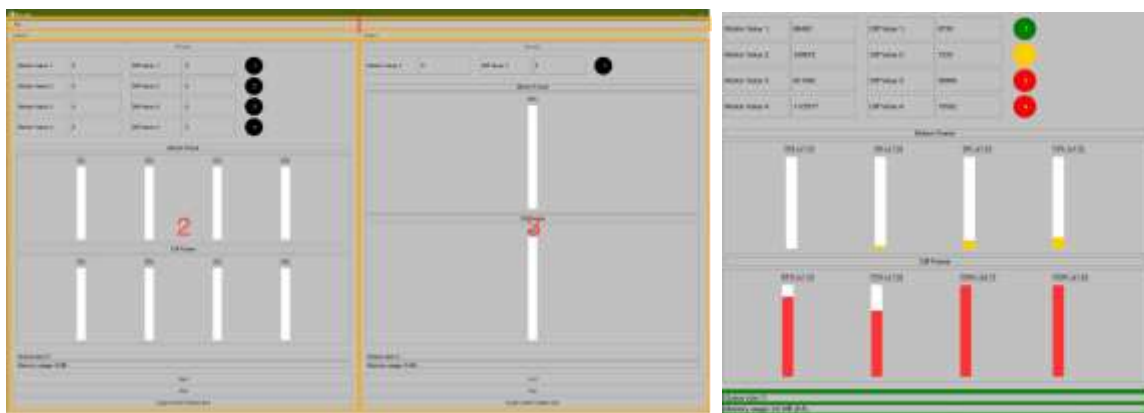


Рисунок 10 – Окно АПКТК

Программа написана с использованием языка программирования Python. Окно разделено на три блока, под номером 1 – блок настройки фотоприемников, 2 – блок контроля дополнительных потерь в оптическом кабеле, 3 – окно рефлектометра для точного поиска места повреждения. АПКТК подключается к резервным проводникам телекоммуникационного кабеля или использует собственные проводники, проложенные вдоль трассы, по которой проходит кабель. В представленном варианте АПКТК имеет 4 независимых канала, при необходимости число каналов может быть увеличено до 32. На рисунке 11 представлен снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывании сигнализации. Внизу рисунка представлен результат опико-цифрового анализа трех воздействий на ВОК, на котором видно, что АПКТК выдал численное значение образовавшихся белых пикселей. Программа фиксирует изменения пиксельной картины светового пятна, так как при механическом воздействии на ВОК происходит переход пикселей из одного цвета в другой, от черного к белому.

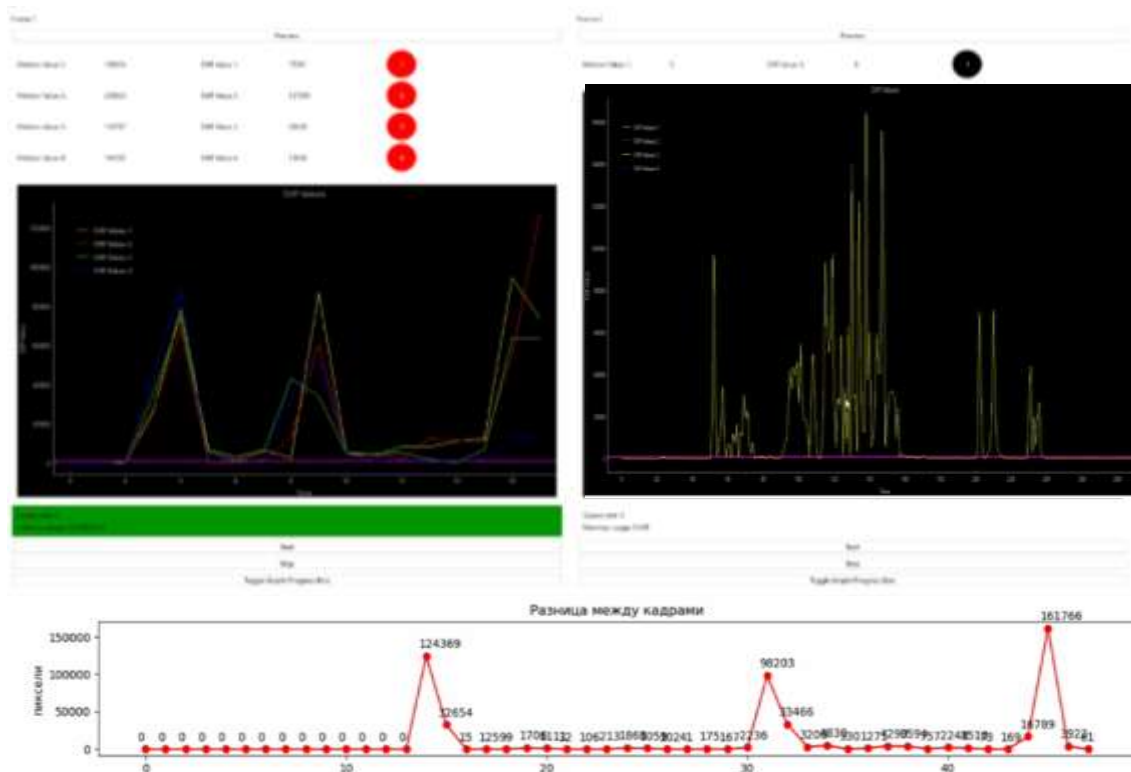
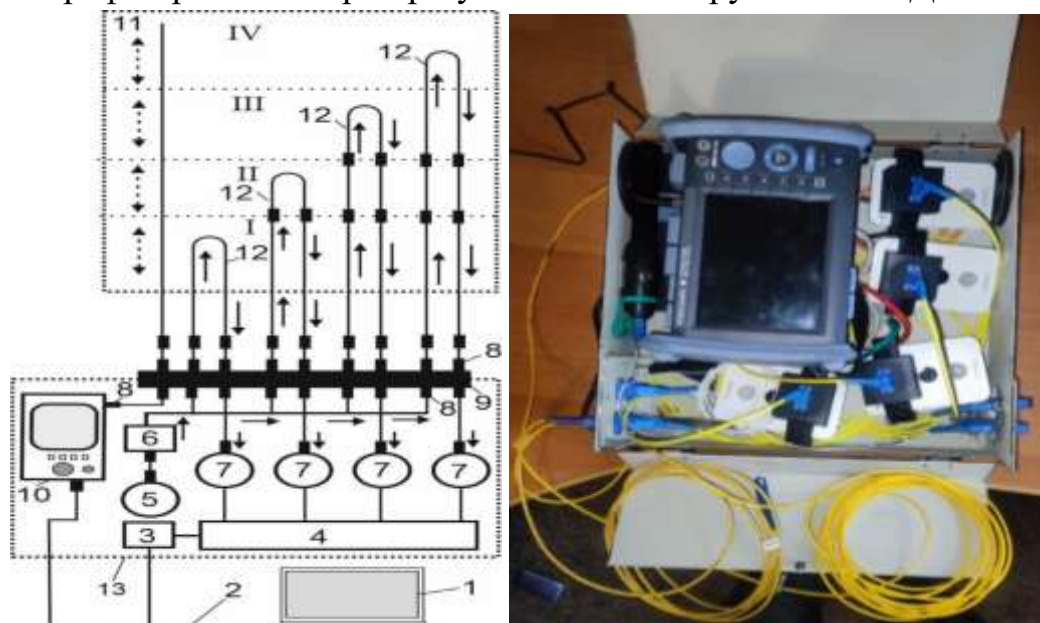


Рисунок 11 - Снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывания сигнализации

При воздействии на оптический кабель злоумышленниками или в случае его повреждения АПКТК фиксирует данное действие и загорается индикатор желтого цвета. Если воздействие продолжается или кабель продолжает растягиваться и обрывается, то загорается указатель красного



цвета. Для точного определения места повреждения или несанкционированного доступа используется оптический рефлектометр, который запускается программой автоматически. На рисунке 12 представлена схема АПКТК с подключёнными ВОД. На рисунке 13 показан график роста потерь при увеличении нагрузки на ВОД



1 – компьютер с программным обеспечением; 2 - соединительный кабель; 3 - устройство согласования с компьютером; 4 – микропроцессор предварительной обработки данных; 5 - полупроводниковый лазер с длиной волны в 650 нм; 6 – оптический разветвитель (сплиттер); 7 – фотоприемное устройство; 8 – оптические соединительные коннекторы; 9 – оптический кросс для подключения оптических коннекторов; 10 – корпус блока обработки данных; 11 – кабельный канал; 12 – одномодовый волоконно-оптический датчик (стандарта G652)

Рисунок 12 – Схема АПКТК

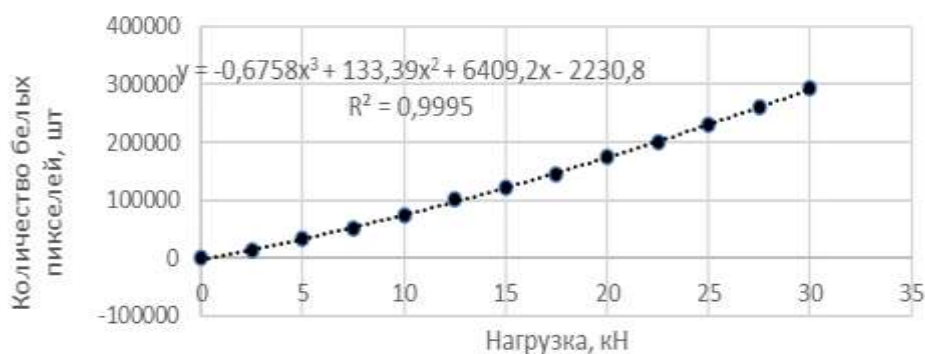


Рисунок 13 – График роста потерь при увеличении нагрузки на ВОД

АПКТК и ВОД были откалиброваны при помощи силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4 и испытаны в реальных условиях на телекоммуникационном оборудовании национального оператора АО «Казхателеком» с получением положительных отзывов специалистов, результаты внедрения оформлены актом. На рисунке 14 представлены результаты зависимости роста потерь при калибровке ВОД.

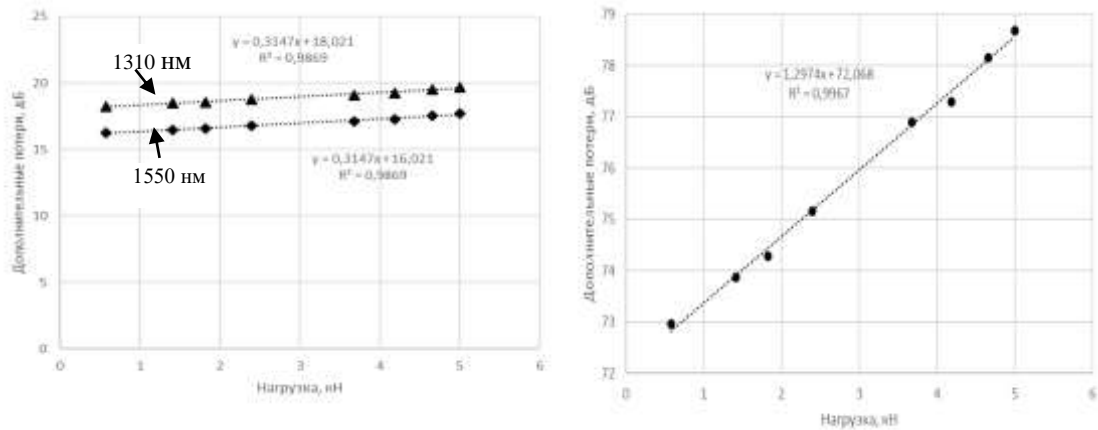


Рисунок 14 – Зависимости роста дополнительных потерь от роста нагрузки на ВОД

Программа может распознать помехи по различным критериям, например по скорости роста или количеству сформировавшихся белых пикселей, белой стрелкой показана область возникновения помех (рисунок 15).

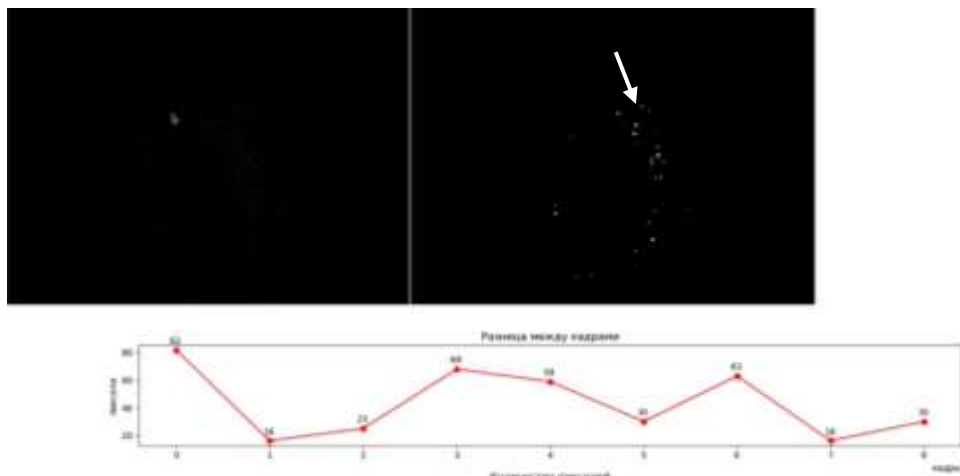


Рисунок 15 – Внешнее вибрационное воздействие на ВОД

Программа позволяет различать воздействие на ВОК и помехи, например, изменение внешней температуры или порывы ветра. Помехи всегда порождают меньшее количество белых пикселей по сравнению с воздействием при несанкционированном доступе на ВОК. Если

воздействие было оказано несколько раз с определенной частотой, интенсивностью и периодичностью, то это воспринимается как вторжение. Программа анализирует изменение картины пикселей светового пятна и принимает решение о срабатывании сигнализации. Более сильное воздействие вызывает большие изменения картины пикселей и провоцирует их переход от черного к белому цвету.

### **Заключение**

Диссертационная работа содержит новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты, совокупность которых имеет важное значение для контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности.

В полном объеме решены поставленные задачи:

Разработана физико-математическая модель оптических процессов в одномодовом волокне при его деформациях и выполнено компьютерное моделирование внешнего силового воздействия на ВОК. Методами компьютерного моделирования выполнена имитация процесса повреждения оптического волокна при различных типах механического воздействия, при удлинении ОВ на 1% срок его службы снижается до 3-4 лет;

Разработан аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния дополнительных потерь (АПКТК) и рассеяния оптического излучения Рэлея, при этом ВОК использовался в качестве распределенного датчика протяженностью до 30 км и количеством независимых каналов до 32;

Выполнены экспериментальные исследования опытного образца аппаратно-программного комплекса, которые доказали его работоспособность и высокую чувствительность при достаточно высоких показателях линейности характеристик и помехоустойчивости. В процессе экспериментов установлена следующая зависимость: при механическом воздействии и изгибе на длинах волн 1625 нм, ОВ имеет меньшие потери, так как уровень рассеяния меньше, чем на длинах волны 1550 и 1310 нм. ОВ при внешнем силовом воздействии и изгибе на длинах волн 1625 нм характерно большим значение дополнительных потерь, в сравнении с волной 1550, а снижение длины волны до 1310 нм еще снижает потери, но при формировании угла изгиба менее критического наблюдается обратная зависимость;

Разработана методика контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям на основе оптико-цифрового анализа параметров оптического излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна и проведена практическая апробация в АО «Казахтелеком».

Численной мерой оптического шума является относительная плотность шума, определяемая как отношение мощности электромагнитной волны (потока), снимаемой с фотоприемника, к мощности оптического шума в ОВ. Эксперименты показали, что защитное покрытие из акрилового лака не оказывает существенного влияния на показатели прочности ОВ, максимально прочность может вырасти до 15%, так как модуль Юнга для полимерных покрытий является значительно меньшим, чем модуль Юнга материала ОВ. Контроль потерь в волоконно-оптических кабелях позволяет предотвратить несанкционированный доступ к информации. Для этого необходимо использовать рефлектограммы.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Алькина А. Д. Физические основы создания датчиков давления на основе изменения коэффициента преломления света при микроизгибе оптического волокна / А. Д. Мехтиев, А. В. Юрченко, Е. Г. Нешина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 2(746). – С. 129-136. – DOI 10.17223/00213411/63/2/129 (Russian physics journal).

2. Алькина А.Д. Автоматическая система контроля целостности волоконно-оптических кабелей/ Аймагамбетова Р. Ж., Юрченко А.В. , Мехтиев А.Д., Мадиди П.Ш. //Мир измерений, 2023.№2

3. Алькина А.Д. Разработка лабораторного образца системы контроля технического состояния оптических кабелей / Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Мадиди П.Ш., Аймагамбетова Р.Ж. // Вестник ТОГУ. 2023. № 1(68). – С. 71-80

4. Алькина, А. Д. Разработка автоматической системы контроля кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков / Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Мадиди П.Ш., Аймагамбетова Р.Ж // Вестник КГЭУ. 2023.Том 15. №1 (57). – С. 125-143.

#### **Публикации в изданиях, входящих в международную базу банных SCOPUS и Web of Science.**

1. Alkina, A. Studying Additional Losses of Standard G.652 Optical Fiber with Protective Cadding During Multiple Bending to Develop Weight Control Sensor / Mekhtiyev, A., Neshina, Y., Sansyzbay, K., Yurchenko, A. Madi P.Sh. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2022, 100(7), p. 1983–1995

2. Alkina, A.D. Research of Mechanical Stress at Tension of Quartz Optical Fiber (QOF) / Kovtun, A.A. Yugay, V.V. Aimagambetova, R.Z., Neshina E. G. // Metalurgija 60 (2021) 1-2, 121-124

3. Alkina, A. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements / Yugay, V., Mekhtiyev, A., Madi, P., Afanaseva,

O., Ilyashenko, S.// Sensors. – 2020, (22)5, 1735

4. Mekhtiyev, A.D. Yurchenko A.V., Neshina Y.G., Alkina A.D., Kozhas A.K., Zholmagambetov Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 56 (2020) 2, 179–190.

#### **Публикации в других научных изданиях**

1. Alkina, A. Passive Perimeter Security Systems Based on Optical Fibers of G 652 Standard / Mekhtiyev, A.D., Yurchenko, AA. Neshina, Y. Yugay, V // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT Volume 7, Issue 1, 2019, Pages 31-36 7th International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIIT 2019; Koethen; Germany; 6 March 2019

2. Alkina, A.D. The Use of Optical Fiber for the Creation of Security Systems for Electrical Cables of Distribution Networks of 0.4 kV / Yugay, V.V., Mekhtiyev, A.D., Sh Madi, P., Alkina, A.D., Neshina, E.G.// Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2140(1), 012002

3. Alkina, A.D. Comparing Methods of Controlling Unauthorized Access to Fiber-Optic Transmission Lines / Mekhtiyev, A.D., A V Yurchenko, T N Shaigarayeva , A D Alkina, Y G Neshina //IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1327 (2019) 012026 IOP Publishing

4. Alkina, A.D. Some Issues of Developing Fiber-Optic Systems for Protection of Distributed Parameters / A D Mekhtiyev, A V Yurchenko, Y G Neshina, R A Mekhtiyev // IMET 2020. Journal of Physics: Conference Series 1843 (2021) 012005 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1843/1/012005

5. Alkina, A. D. Investigation of Additional Losses in Optical Fibers Under Mechanical Action / A V Yurchenko, A D Mekhtiyev, F N Bulatbaev, Y G Neshina, Madi P.Sh. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. - Vol.516. - No.012004. - Pp.1-5

6. Alkina, A.D. Development of a Model Fiber-Optic Sensor of The External Action on the Basis of Diffraction Gratings With Variable Parameters Of The System / Madi P.Sh.,Kalytka V.A., Nurmaganbetova M.T.// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. - Vol.1327.-No.012036.-Pp.1-5.

7. Alkina, A.D. Research of the Additional Losses Occurring in Optical Fiber at its Multiple Bends in the Range Waves 1310nm, 1550nm and 1625nm Long / Yurchenko, A.V., Gorlov, N.I., Mekhtiev, A.D., Kovtun, A.A. // Journal of Physics: Conference Series 671 (2016) 1 №012001 IOPscience. DIO:10:1088/1742-6596/671/1/012001).

8. Alkina, A.D. Hardware-software Complex for Monitoring Incidental Losses Occurring in Optical Communication Cables under Mechanical Effect / A. V. Yurchenko; P. Sh. Madi; A. D. Mekhtiyev; Y. G. Neshina; R. Zh. Aimagambetova 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) 11-13 November 2022 DOI:

10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017027

9. Алькина А.Д. Импульсно-рефлектометрический метод определения местоположения / Ковтун А.А., Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г. // Научные труды военно-инженерного института радиоэлектроники и связи. № 2 (40), (июнь) 2020. С 30 - 37.

10. Алькина А.Д. Исследование волоконно-оптического датчика смещения / П. Ш. Мади, С. Б. Ожигина, Р. А. Мехтиев // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: Сборник научных трудов X Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 09–11 ноября 2021 года. – Томск: НИ ТПУ, 2022. – С. 152-155.

11. Алькина А.Д. Основы математического моделирования дифракционной решетки для датчиков оптоволоконных контрольно-измерительных систем / П. Ш. Мади, В. А. Калытка // SIBTEST - 2019 : Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, 26–28 июня 2019 года. – Екатеринбург, 2019. – С. 42.

12. Алькина А.Д. Исследование дополнительных потерь в оптических волокнах при механическом воздействии / Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Булатбаев Ф.Н., Нешина Е.Г., Мади П.Ш. // Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». 2018. – С.8.

13. Алькина А.Д. Исследование волоконно-оптических датчиков смещения / Мади П.Ш., Мехтиев А.Д. // Международная научно-теоретическая конференции «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», посвященная 30-летию Независимости Республики Казахстан. 2021. – С.92-95.

14. Alkina A. D. Hardware-software Complex for Monitoring Incidental Losses Occurring in Optical Communication Cables under Mechanical / A. V. Yurchenko; P. Sh. Madi; A. D. Mekhtiyev; Y. G. Neshina; R. Zh. Aimagambetova // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017027

#### **Патенты:**

Пат. На полезную модель РК 6862. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации / Мехтиев А.Д., Мади П. Ш., Ковтун А. А. Алькина А.Д., Нешина Е. Г., Югай В. В. Опубл. 28.10.2022.

Пат. На полезную модель РК 7775. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации для предупреждения аварийного разрушения железобетонных конструкций и любых протяженных объектов / Мехтиев А. Д., Аймагамбетова Р. Ж., Аубакирова Б. Б., Қожас А. К., Мади П. Ш., Алькина А. Д., Сарсикеев Е. Ж., Мехтиев Р. А. Опубл. 27.01.2023.