

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Алькина Алия Даулетхановна

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

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор А.В. Юрченко

Томск – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Общий анализ литературных источников и описание методов получения первичной информации.....	12
1.2 Выбор схемного решения на основании обзора существующих систем контроля технического состояния протяженных объектов с использованием волоконно-оптических датчиков.....	21
1.3 Использование волоконно-оптических датчиков в различных областях промышленности с анализом международного опыта и их классификация.....	32
1.4 Постановка цели и задач диссертационной работы. Формирование основной научной гипотезы и идеи.....	44
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	48
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	49
2.1 Методы исследования и выбор среды моделирования.....	49
2.2 Метод контроля технического состояния ВОК.....	55
2.3 Разработка физико-математической модели оптико-механических процессов, происходящих при деформации оптического волокна находящегося внутри оптического кабеля.....	67
2.4 Компьютерное моделирование механических нагрузок на оптическое волокно при его растяжении и микроизгибе.....	76

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	90
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, РАЗМЕЩЁННЫХ В ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ.....	92
3.1 Общие вопросы и основа предлагаемой методики контроля.....	92
3.2 Исследование дополнительных потерь в ОВ при его изгибе.....	99
3.3 Контроль дополнительных потерь оптического волокна стандарта G.652 для оценки нагрузки при микроизгибе.....	107
3.4 Исследование внешних механических воздействий на величину дополнительных потерь в телекоммуникационных волоконно-оптических кабелях в условиях эксплуатации.....	113
3.5 Исследование внешних механических воздействий на величину обратного рассеяния для контроля роста дополнительных потерь при несанкционированном доступе к ВОЛП.....	116
3.6 Исследование лабораторного образца системы контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности.....	120
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	126
4 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ ПО ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОТЕРЯМ.....	129
4.1 Разработка аппаратно-программной части комплекса контроля технического состояния оптических кабелей.....	129
4.2 Калибровка АПКТК при помощи силовоспроизводящей машины МСВ- 10МГ-4.....	166
4.3 Практическая апробация АПКТК	167
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	177
Приложение А.....	200
Приложение Б.....	202

Приложение В.....	207
Приложение Г.....	211
Приложение Д.....	213
Приложение Е.....	220
Приложение Ж.....	222
Приложение З.....	227
Приложение И.....	230
Приложение К.....	234
Приложение Л.....	250
Приложение М.....	264
Приложение Н.....	266

ВВЕДЕНИЕ

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 внутризоновых 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 Рэлея. 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 Рэлея, 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 Рэлея;
- 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 оптоволокна, 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 распределённого, 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. Использованы 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 проведённых 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.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общий анализ литературных источников и описание методов получения первичной информации

Уже сложившийся факт, что все системы телекоммуникации перешли в подавляющем большинстве на волоконно-оптические линии передачи информации (ВОЛП). Основные как международные, так и внутренние магистрали, а также внутризоновые системы телекоммуникации сейчас используют оптическое волокно (ОВ) в качестве проводников, по которым передается информация. ВОЛП полностью доминируют на всех участках системы телекоммуникации. По одному одномодовому ОВ толщиной всего 125 мкм можно передать телефонные разговоры нескольких тысяч абонентов одновременно, причем с высоким качеством. Качество, пропускная способность, невосприимчивость к электромагнитным помехам и многое другое являются основным преимуществом ВОЛП [1,2]. В литературе достаточно много сведений о ОВ, ВОЛП и направляющих системах телекоммуникации, в которых используются волоконно-оптические технологии [1-5]. ОВ можно использовать по своему прямому назначению для передачи информации в системах телекоммуникации, но также у него есть еще одна достаточно обширная сфера применения, связанная с измерением и контролем различных физических параметров. Подробно познакомиться с различными волоконно-оптическими системами идентификации физических величин можно в источнике [5]. Также в данном источнике можно найти подробную информацию о достоинствах и недостатках волоконно-оптических датчиков (ВОД), а также узнать специфику их работы и ознакомиться с их конструкцией. Постоянно совершенствуются технологии, средства и принципы измерений, для этого ученые разрабатывают

новые конструкции датчиков, которые в современных условиях должны быть интеллектуальными [6]. Для работы ВОД нужен источник излучения, лазер или светодиод, генерирующий световую волну, которая проходит через ВОД и падает на поверхность фотоприемника. Фотоприемник преобразовывает оптический сигнал в электрический. Принципы действия ВОД и их конструкции, а также история их развития и области применения подробно рассмотрены в источниках [8-14]. Переход от медных кабелей к более совершенным волоконно-оптическим не решил всех проблем, связанных с контролем технического состояния кабелей, их целостности или другой острой проблемы защиты информации от несанкционированного доступа. Проблема защиты информации, передаваемой по каналам ВОЛП, и контроль технического состояния волоконно-оптических проводников систем телекоммуникации не является новой, ее поднимали еще в конце прошлого и начале настоящего века, даже в настоящее время данная проблема не решена в полном объеме. Существует достаточно много публикаций, посвященных этой проблеме, можно найти многочисленные статьи, как отечественные, так и зарубежные [15-18]. В данных статьях рассматривается проблема несанкционированного доступа к ВОЛП (НД) и предлагаются свои методы для ее решения [19-21]. Контроль технического состояния ВОЛП и НД можно выполнить за счет одной системы мониторинга, которая основана на использовании резервных ОВ оптического кабеля, данная идея выдвинута автором данной диссертационной работы [21].

Так как ОВ не распространяет электромагнитные поля в окружающую среду при передаче данных, то считать информацию невозможно, поэтому их стали считать линиями связи с повышенной скрытностью, но картина изменилась с приходом новых технологий НДСВ. В начале настоящего века об этой проблеме заговорили как ученые, так и инженеры. В статье [22] рассмотрены проблемы контроля целостности оптического кабеля и НД. С развитием техники и технологии НД возможности съема информации тоже расширяются, а сами методы и средства совершенствуются. При микроизгибе небольшая часть рассеянного оптического излучения выходит за пределы оболочки и при

использовании соответствующих технических средств информации может быть считана. При нарушении целостности или удалении внешней защитной оболочки ВОК и использовании средств для съема оптического сигнала можно организовать процесс НД [14-19]. Например, имеется способ, который позволяет снимать информацию через боковую поверхность ОВ, но при этом наблюдается изменение параметров распространяющегося оптического излучения (моды), при этом уровень мощности оптического сигнала снижается, это вызывает подозрение, и точка съема информации может быть обнаружена при помощи оптического рефлектометра [20]. Завершая вступление, хочется перейти к непосредственному научному анализу литературы, которая имеет отношение к теме исследования и рассмотреть подробнее методы сбора первичной информации. Для начала нужно отметить, что у ученых России есть определённые достижения в области разработки ВОД и совершенствования их конструкций, а также аппаратной и программной части блоков обработки данных. В разное время изучением свойств оптических волокон и созданием ВОД на их основе занимались отечественные ученые. В дальнейшем их работы будут рассмотрены и проанализированы. В открытом доступе можно найти достаточно большое количество работ ученых из США, Европы и Азии, это достаточно длинный список фамилий и нет необходимости его приводить, так как их публикации и результаты будут подробно рассмотрены. В настоящее время достаточно высокую активность в области развития волоконно-оптической техники и технологий, а также ВОД и АПК, проявляют ученые из Азии, а именно, Китая, Сингапура, Тайваня, Японии и других стран данного региона. Ученым из Юго-Восточной Азии принадлежит ряд основополагающих открытий в области развития ОВ и ВОД, сделанных еще в 90-х годах прошлого века. Как отечественные, так и зарубежные ученые на протяжении 50 лет сформировали ряд научных направлений развития волоконно-оптической техники и технологий, ВОД и ОВ, систем передачи информации, мониторинга, контроля, технической диагностики, а также разработки новых перспективных средств и методов

контроля технического состояния, в том числе и протяженных объектов и строительных конструкций [21,22].

Описание методов получения первичной информации начинается с принципа выбора источников для получения надежной и проверенной информации, так как необходимо иметь высокую степень достоверности. Рассматривая совокупность источников информации, можно уделить внимание интернет-сайтам, конечно, представленная информация не имеет высокой степени надежности и может содержать определенные искажения или неточности, но в данной работе интернет-источники использовались в самом минимальном объеме и лишь для получения общей информации. Полученная информация подвергалась сравнению и анализу, если обнаруживались расхождения или подозрения на неточность сведений, источники исключались из обзора. Например, источники информации [23-25] были использованы только для получения общей информации и рекомендуются для понимания принципов работы ВОД и получения сведений о его характеристиках.

Для получения информации о выпускаемых промышленностью ВОД были использованы официальные сайты компаний, которые производят ВОД или выполняют проекты [26-28]. Полученная информация была проанализирована, аналогичных предлагаемых ВОД и методов обработки данных на данных сайтах не обнаружено. Имеется информация об использовании ВОД в нефтегазовой сфере, но используемые ВОД не имеют сходства с предлагаемыми в рамках данной диссертации ВОД [29]. Как сказано ранее, частично некоторая информация была получена из открытых источников, размещенных в интернете, но была отобрана с помощью тщательного анализа и сравнения с информацией, размещенной на аналогичных сайтах компаний [26-28].

Основными источниками информации являются источники, которые отвечают принятым общенаучным методам и прошедшие рецензирование. Поэтому в данной работе при сборе и анализе информации о волоконно-оптической технике и технологиях, а также ВОД и АПК использовались проверенные источники, а именно научные статьи, находящиеся в свободном

доступе наукометрических баз данных WoS и Scopus, что касается статей, размещенных в журналах с закрытым доступом, то изучалась аннотация и по ней делался вывод о пригодности данного источника для изучения. При изучении источников использовались возможности библиотеки НИИ ТПУ и КарТУ. Выбор баз данных WoS и Scopus оправдан тем, что это выход на более масштабные хранилища научных сведений, сформированные на протяжении нескольких десятков лет, в том числе имеющие публикации прошлого века. Это позволяет найти свой путь, разработать свои собственные подходы и методы, а также избежать дублирования и повторения чужих исследований. Также можно сравнить полученные результаты с результатами других ученых, что весьма важно при оценке своих научных достижений и результатов. Статьи, размещенные в базах данных WoS и Scopus, опубликованы на английском языке, это не является проблемой и не создает трудностей, так как английский язык изучался в рамках университетской программы и программы аспирантуры НИИ ТПУ. Соответственно навыки, сформированные при изучении английского языка, позволяют преодолеть проблему понимания сущности и содержания научной статьи.

В процессе подготовки диссертации уделялось внимание изучению отечественных и зарубежных патентов, в том числе Республики Казахстан, которые тоже являются гарантированно надежными источниками первичной информации, так как прошли соответствующую экспертизу по существу. Анализ патентной базы проводился с целью исключения дублирования известных конструктивных решений и достижения одинакового технического результата, а также исключения одинаковой сути изобретения. Помимо зарубежных публикаций были рассмотрены статьи отечественных ученых, размещенных в базе данных РИНЦ, многие статьи были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Статьи данных баз в большей мере представлены на русском языке, это существенно облегчает понимание содержания статьи. Все использованные статьи прошли рецензирование и проверку на плагиат, что позволяет утверждать о надежности полученной информации. Этим также была

обеспечена достоверность полученных сведений о современном состоянии и уровне научных достижений в области исследований, проведенных в рамках настоящей диссертационной работы. Без внимания не остались и научные работы, опубликованные в Казахстанской базе данных КазБЦ, так как работа подготовлена и выполнена в НИ ТПУ, но для последующего внедрения в АО «Казахтелеком», то данное обстоятельство весьма важно. Результаты настоящей диссертации были доложены на техническом заседании при участии специалистов АО «Казахтелеком» (Карагандинский филиал). Данная апробация была необходима для формирования актуальности и практической новизны предлагаемого технического решения. Предварительный анализ показал, что в области разработки новых волоконно-оптических технологий, ВОД и ОВ лидируют ученые из юго-восточной Азии: Сингапура, Китая, Тайваня, Японии и др. Конечно, имеются разработки ученых из Европы и Америки, о которых будет рассказано далее. Также будут рассмотрены работы ученых России, так как, несмотря на определенный пробел в научных знаниях, разработки в области ВОД ведутся и есть достаточно успешные промышленные реализации. В анализе использованы статьи, которые изданы ранее 2012 года, но они больше нужны для оценки уровня развития и совершенствования волоконно-оптических технологий. Например, в базе Scopus были найдены основополагающие статьи прошлого века [30-32]. Это авторы, которые стояли у основ волоконно-оптической техники и технологий, в данных публикациях представлена историческая справка о первых образцах ОВ и этапах его совершенствования. Далее идут источники уже нашего века, в которых представлены достижения и результаты по разработке ОВ, ВОД и другой волоконно-оптической техники [33-37]. ОВ, которое будет использовано в данной работе, для создания ВОД прошло сложный и долгий этап своего развития, чтобы приблизиться к своим настоящим параметрам и занять достойное в системах телекоммуникации место, вытеснив медные кабели. Как сказано ранее, большая часть проанализированных источников относится к периоду времени издания с 2012 года по 2022 год, при этом из анализа практически исключались источники 2023 года, но вот наиболее важные работы были изучены. Можно с

уверенностью сказать, что даже не все статьи за 2022 год внесены в базу WoS и Scopus, так как процесс внесения сведений продолжается, на основании чего можно предположить, что снижение количества статей за 2022 год является объективным фактом. Использование статей 2023 года ограничено тем, что базы данных достаточно медленно обновляются и ожидать полное включение всех публикаций за 2022 год можно к концу 2023 года, а вот статьи 2023 года будут полностью отражены к концу 2023, а также в течение 2024 года. Справедливо ожидать, что статистика по 2023 году будет объективно отражена в 2024 году. В любом случае наблюдается рост тенденции увеличения количества публикаций с 2021 по 2022 годы, которые посвящены развитию волоконно-оптических технологий и ВОД. Ежегодный рост количества публикаций, посвященных волоконно-оптическим технологиям, ВОД, ОВ и системам обработки данных, полученных от ВОД, оправдан развитием научно-технического прогресса. Переход от электрических сигналов в телекоммуникации, компьютерной, контрольно-измерительной технике и других областях науки достаточно аргументирован и экономически оправдан. Анализ русскоязычных публикаций ученых России и Казахстана баз данных РИНЦ, показал, что проводятся аналогичные исследования, имеются достаточно интересные результаты о создании ВОД для различных отраслей промышленности. Также имеется рост популярности проведения исследований в области развития волоконно-оптической техники и технологий, а также есть увеличение количества публикаций, посвящённых созданию новых систем измерения и контроля на основе ВОД. В ходе раскрытия данной диссертационной работы будут рассмотрены наиболее важные публикации российских ученых, которые работали над созданием различных видов ВОД. Есть немаловажный факт, что количество публикаций российских ученых отстает от количества англоязычных статей, так как часть публикаций российских ученых тоже выходят на английском языке. Есть объективный факт, что ученые России выбирают журналы баз данных WoS и Scopus из-за различных причин, взамен базы данных РИНЦ. Имеются результаты, связанные с разработкой новых ВОД для нефтегазовой отрасли.

Данные датчики рассчитаны на работу в тяжелых и агрессивных условиях эксплуатации, можно также сказать, что в некоторых случаях у ВОД нет альтернативы, так как классические электрические датчики не справляются с перегрузками. Есть некоторые работы российских ученых, которые посвящены созданию систем охраны нового поколения, в основе которых лежат ВОД. Обо всех достижениях, как российских, так и зарубежных ученых будет подробно рассказано далее. Также будут подробно рассмотрены полученные результаты предшественников с указанием конкретных ссылок на литературный источник, благодаря чему возможны проверка и оценка достоверности представленных сведений. Большее количество англоязычных статей объясняется тем, что большая часть мировых ученых выбирают английский язык для своих публикаций и размещают свои статьи в журналах баз данных WoS и Scopus.

В общем было найдено 5000 различных статей в базах WoS и Scopus, а также частично в анализ были включены статьи из базы данных РИНЦ, все статьи были проанализированы, а наиболее близкие и ценные были включены в список использованной литературы, так как входят в область научных направлений данной диссертации (рисунок 1). Такое значительное количество статей не означает, что они все посвящены ВОД, напротив, их не так уж много, примерно около двух тысяч, и они тоже затрагивают различные области науки. Например, достаточно много статей, посвящённых производству ОВ и его использованию для передачи информации в системах телекоммуникации. Представленная диаграмма показывает рост публикаций, посвящённых ВОД, волоконно-оптической технике и контролю или измерению различных параметров при ВОД, еще одной важной областью является использование ОВ в системах телекоммуникации и создания новых типов ОВ. Например, ОВ может применяться в военной технике или медицине, а также в горном деле, широта применения достаточно большая, соответственно и количество статей тоже значительное. Выбранные публикации относятся к разным направлениям, но их объединяет одно важное слово, это ОВ. Как сказано ранее, изучалась аннотация статьи и велся поиск, по ключевым словам.

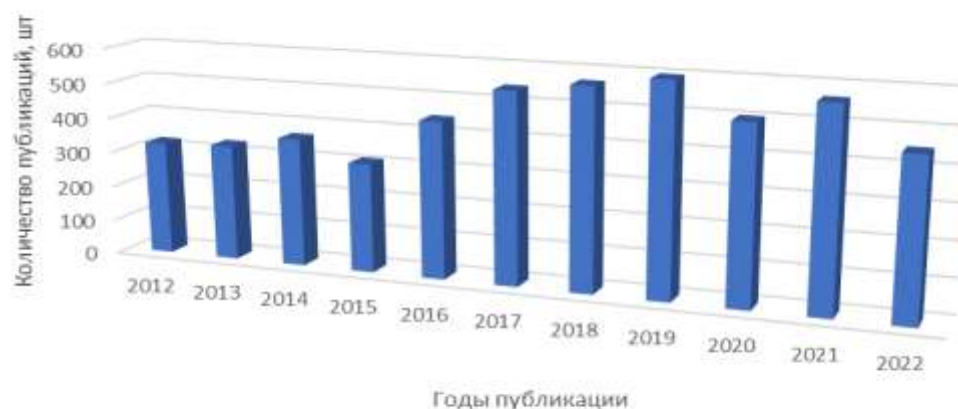


Рисунок 1 - Результаты анализа баз данных РИНЦ, WoS и Scopus

Статьи, посвящённые развитию ОВ и созданию новых технологий, тоже были включены в анализ, но в список использованной литературы не вошли, так как относятся к другой области науки и техники. Диаграмма показывает уверенный рост с 2012 по 2019 годы, затем наблюдается некий провал в 2020 году и незначительный рост в 2021 году. Вероятно, ученые снизили свою активность из-за пандемии COVID-19, и часть исследований было приостановлена. Столбик показателей количества публикаций 2022 года, вероятно, будет выше, чем 2021 года, так как не все статьи были включены в базы данных на момент проведения анализа. При проведении литературного анализа учитывался положительный и отрицательный опыт, делались соответствующие выводы и вносились корректировки в АПК. Зарубежные авторы предлагающие свои конструкции ВОД порой не понимают, что, по сути, сам по себе ВОД не решает всех проблем и не работает без АПК, так как для любого ВОД требуется блок обработки данных. Еще анализ показал, что не все ВОД могут быть использованы для систем телекоммуникации, так как не отвечают требованиям данной сферы и условиям эксплуатации. Проведенный анализ литературных источников мирового научного пространства дал определенные и положительные результаты для формирования научной новизны и практической значимости данной диссертационной работы, а также позволил сформировать ее цель и задачи. В анализе литературы рассмотрены патенты различных баз данных, в том числе России и Казахстана, а

также других стран. Проанализировано около 50 различных патентов, из которых отобраны наиболее интересные и близкие к теме диссертационной работы [38-48]. Представленные в списке литературы зарубежные и отечественные патенты посвящены разработке ВОД, которые предназначены для различных сфер деятельности человека. В указанных источниках имеется подробное описание основного технического решения и всех преимуществ предлагаемых ВОД, полученные сведения были использованы для оценки собственных технических решений, а также формирования новизны. Изучение патентов позволило подготовить собственные патенты, в которых принимал участие автор настоящей диссертации [49-58], в дальнейшем указанные патенты будут использоваться при разработке АПК и ВОД. Все представленные патенты имеют техническую новизну и отличие от своих аналогов.

1.2 Выбор схемного решения на основании обзора существующих систем контроля технического состояния протяженных объектов с использованием волоконно-оптических датчиков

Ранее уже был проведен обзор существующих систем контроля и мониторинга технического состояния протяженных объектов с использованием волоконно-оптических датчиков, результаты опубликованы [59]. В настоящем разделе выполнен подробный обзор различных научных направлений волоконно-оптической техники технологий, а также самих ВОД и ВОК. В данном разделе будут использованы графические материалы, принадлежащие другим автором, но на них будет дана соответствующая ссылка. Графический материал не подвергался редакции или иным искажениям, так как используется для более полного понимания сути предлагаемого технического решения. Также будут даны ссылки на сами источники, из которых получен графический материал, и изученную информацию. Выбор собственного схемного решения основан на результатах изучения и анализа опыта других ученых. Обзор выполнен для изучения опыта в области разработки современных интеллектуальных систем

контроля и мониторинга технического состояния протяженных объектов с использованием ВОД. Проведен литературный обзор существующих как интеллектуальных, так и обычных систем контроля технического и целостности протяженных объектов, таких как строительные конструкции, электрические и телекоммуникационные кабели, плотины, насыпи и трубопроводы для транспортировки жидкостей и газа. Каждый автор статьи предлагает свою схему организации системы мониторинга и контроля (СМК), а также свои конструкции ВОД. Также предлагаются свои методы контроля и обработки данных, полученных от распределенных или квази-распределённых ВОД. Рассматриваются также и точечные ВОД для различного применения. Авторы формируют свои научные гипотезы и идеи, а также предлагают оригинальную схему СМК и приводят подробное описание принципа ее действия. Каждая статья содержит результаты исследований и выводы. Авторы приводят не только схемы, но также дают рекомендации по повышению точности идентификации места повреждения объекта. Большинство публикаций указывает на то, что для контроля протяженного объекта длиной в 10-50 км для повышения точности лучше использовать оптический рефлектометр. Можно также применять волновые решетки Брэгга (ВРБ), но понадобится более дорогой прибор для анализа отраженного спектра. Уже известно, что при механическом внешнем воздействии на ОВ, ОВ меняет свои параметры и коэффициент преломления. Соответственно меняется ход луча в оптическом интерферометре (Маха — Цендера, Фабри — Перо и другие), меняются параметры оптического рассеяния (Рэлея, Мандельштама — Бриллюэна) или ширина полосы отражения Брэгговской решетки. Предлагаемый в дальнейшем собственный метод имеет принципиальные отличия и основан на принципе оптико-цифрового контроля параметров светового пятна, лежащего на поверхности фотоматрицы с высокой разрешающей способностью. Информацию об оптическом интерферометре можно получить из источников [60,61]. Информацию о методе оптической рефлектометрии и как работает оптический рефлектометр OTDR, а также о видах оптического рассеяния (Рэлея, Мандельштама — Бриллюэна и других) можно

получить из источников [2,62]. Информацию о ВБР можно получить из источников [63-65], в них рассмотрено применение ВБР. Можно отметить, что ВБР продолжают свое активное развитие.

В процессе анализа были выявлены, на наш взгляд, некоторые недостатки предлагаемых ниже схем контроля с помощью ВОД и даются рекомендации по улучшению работы схемы. Также были рассмотрены обстоятельства возникновения различных помех, которые нарушают работу системы контроля и вносят искажения в измерения, а порой просто генерируют ложные значения, это достаточно острая и типичная проблема для оптических интерферометров. Данные оптические приборы имеют определенную зависимость стабильности измерений от изменения температуры ОВ [60,61]. Авторы отмечают, что возникает известный эффект задержки сигнала или «фединга», при этом наблюдается изменение фазы распространения оптического сигнала при изменении температуры ОВ. Эта проблема свойственна для всех схем, в которых используются оптические интерферометры любого типа. Большая часть авторов отмечают, что имеется проблема, связанная с изменением механических напряжений ОВ, аналогично при изменении температуры, формируются помехи, которые мешают работе системы контроля. Для борьбы с помехами предлагаются различные методы фильтрации помех, но, по мнению многих авторов, наиболее эффективными являются системы фильтрации на основе алгоритмов искусственного интеллекта. Хороший результат достигается при использовании методов оптической рефлектометрии OTDR с анализом данных производимой нейронной сетью, но имеются как достоинства, так и недостатки, это касается распределенных ВОД значительной протяженности. Положительный опыт использования рефлектометра и интеллектуальной оценки данных будет частично использован в данной работе как дополнительный метод для уточнения расстояния до точки повреждения. В настоящий момент времени для определения места повреждения оптического кабеля используется метод оптической рефлектометрии OTDR, но только в ручном режиме, планируется полностью автоматизировать процесс измерения за счет АПК. Как сказано ранее,

протяжёнными объектами для контроля (ПОК) можно считать: монолитные железобетонные фундаменты и конструкции (мосты, здания, сооружения, плотины и другое); насыпи и дамбы; путепроводы и дорожное покрытие; различные трубопроводы, применяемые для транспортировки жидких и газообразных сред; различные кабели (электрические и телекоммуникационные) и другие объекты, которые имеют значительную протяженность. Так как данная работа нацелена на контроль технического состояния внутризоновых оптических кабелей, а не магистральных, то протяженность ВОД может быть до 50-60 км. Длина магистральных кабелей и трубопроводов составляет сотни, а в некоторых случаях тысячи километров, что требует использования нескольких регенерационных станций, так как ОВ имеет затухание сигнала. Системы контроля и ранней диагностики оптических магистральных и трансконтинентальных кабелей уже существуют и работают в основном на длине волны 1550-1625 нм и являются достаточно сложными и дорогими для применения их в городских локальных сетях телекоммуникации. Еще нужно учитывать влияние различных видов дисперсии, которые проявляются достаточно существенно на расстояниях от 60 км и более. Предлагаемый аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния кабелей (АПКТК) использует одномодовое ОВ, у данного типа ОВ коэффициент затухания на порядки ниже, чем у многомодового ОВ. Мномодовое ОВ работает в качестве ВОД более стабильно и с меньшим уровнем помех, но максимальная его длина не превышает 500 метров, пределом и крайне редким случаем является длина ОВ 800 метров, так как сигнал достаточно сильно затухает, а вот одномодовое ОВ способно работать без регенерации на дистанции до 100 км. При использовании многомодового ОВ стандарта G 651 уровень помех значительно ниже, чем при использовании одномодового ОВ стандарта G 652, но проблема ограниченности дистанции является непреодолимой, поэтому многомодовое ОВ исключается из дальнейшего рассмотрения. Мномодовое ОВ стандарта G 651 является достаточно устаревшим и используется в локальных вычислительных системах с протяженностью оптических проводников до 500 метров. Этот факт отмечают

некоторые авторы рассмотренных далее схем. Учитывая собственный научный предварительный задел и результаты, АПКТК будет работать с одномодовым ОВ стандарта G 652 и выше, в случае необходимости. Данный тип ОВ способен без проблем работать на дистанциях 60 км и более. Также в собственной схеме АПКТК будет использован интеллектуальный анализ полученных данных от ВОД, так как планируется использовать одномодового ОВ стандарта G 652, то необходимо разработать метод фильтрации помех и их нейтрализации. Еще один момент актуальности использования одномодовое ОВ стандарта G 652 для построения АПКТК для контроля технического состояния оптических кабелей систем телекоммуникации, так как в данных кабелях многомодовое ОВ не используется и это может стать не преодолимой технической проблемой создания ВОД. Соответственно будущий ВОД будет выполнен на одномодовом ОВ стандарта G 652, так как оно уже имеется в составе кабеля, это позволит свести затраты на изготовление ВОД практически в возможный минимум по стоимости комплектующих деталей и материалов.

Причинами повреждения ВОК и коммутационного оптического оборудования являются: техногенные явления, работы по вскрытию грунта или иные строительные работы, когда из-за человеческого фактора происходят повреждения ВОК; подмыв основания грунта под ВОК или его проседание; чрезмерное провисание ВОК на опорах при нарушении целостности элементов крепления, разрыв ВОК при внешнем силовом воздействии на него различной техники или падении опоры, на которой он был подвешен, повреждение при краже ВОК, попытка НД. Возможно, были допущены нарушения при проектировании ВОЛП, или не соблюдалась технология монтажа, или возникли иные нарушения при эксплуатации ВОК. Схема АПКТК должна выполнять две функции: это контроль технического состояния ВОК по дополнительным потерям и обеспечение защиты от НД, схема будет также дополнительно оснащена оптическим рефлектометром, так как это достаточно эффективное средство точного обнаружения и поиска повреждений ВОК. Данная идея возникла на основании результатов собственных исследований и результатов исследований

сторонних ученых, схемные решения которых будут рассмотрены далее. Схема АПКТК будет содержать два блока: оптико-цифрового анализа параметров светового пятна и анализа изменения параметров рефлектограммы. Метод рефлектометрии OTDR, тоже использовался другими авторами для контроля технического состояния и охраны периметров протяженных объектов. Предлагаемая схема отличается низким электропотреблением, наличием распределенного ВОД и хорошей устойчивостью к электромагнитным помехам. Так как ВОК может укладываться на опорах вблизи проводов высоковольтных линий электропередач, то АПКТК должен быть адаптирован к данным условиям. Информация выводится на экран персонального компьютера в численной и показательной графической форме, схема представлена на рисунке 2. Схема представлена для понимания отличия от своих аналогов.

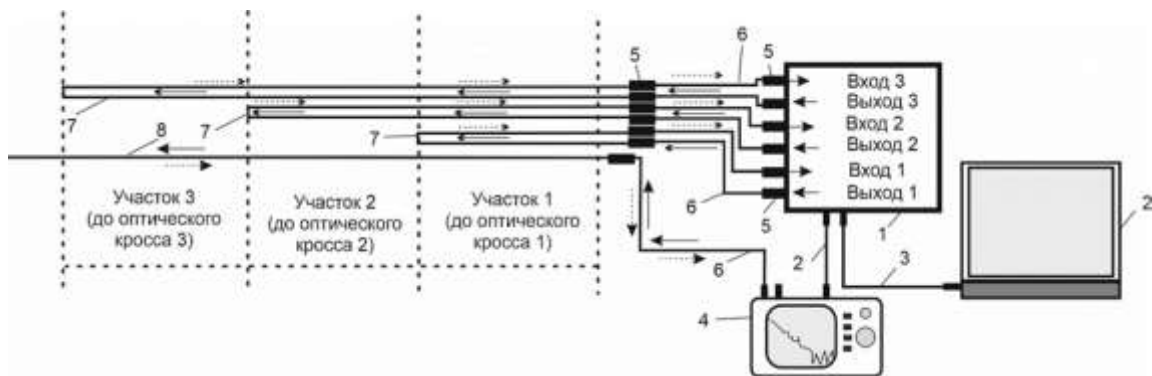


Рисунок 2 - Условная схема компоновки двухблочного АПКТК

- 1 – блок первичной обработки данных; 2 – ноутбук (персональный компьютер); 3 - USB или Ethernet кабель; 4 - рефлектометр; 5 - адаптер;
6 –патч-корд; 7 – квази распределенный ВОД; 8 – распределенный ВОД.

В источнике [66] рассмотрена схема датчика, который реагирует на вибрацию. Благодаря измерению параметров интенсивности, обеспечивается возможность установления расстояния до места воздействия или повреждения протяженного объекта. Используемый алгоритм развёртывания поляризационно-фазового слияния имеет отличие от известных методов, способных точно измерять различные динамические деформации на базе метода восстановления

фактического фазового сигнала из необработанного с амплитудным сигналом. Это обеспечивает достаточно большой диапазон измерения амплитуды поляризованного сигнала, а также обеспечивается высокая чувствительность, которая определяется фазовым сигналом. Автор указывает на одну из особенностей использования нескольких ВРБ, находящихся последовательно, это существенно усложняет конструкцию и уменьшает надежность СК. Автор отмечает, что СК легко обнаруживает месторасположение точки механического воздействия на ОВ, но при этом не позволяет распознавать помехи, вызванные человеком или техникой, что является достаточно весомым недостатком [66]. В экспериментах был использован полупроводниковый лазер инфракрасного диапазона с длиной волны 1550 нм шириной полосы 100 Гц. Данная СК обладает высокой чувствительностью к механическому воздействию и изменению температуры, СК способна подавлять помехи.

Методы рефлектометрии позволяют более точно определить расстояние до места механического воздействия, деформаций или вибраций [67]. Данный метод очень распространен для построения СК с интерферометрией. Принцип работы интерферометрии известен, и для его реализации нужно, чтобы в оптический кабель был подан сигнал от источника излучения (полупроводниковый лазер), который делится на два равных по мощности сигнала при помощи оптического разветвителя. Метод АОМ используется для подавления помех. Авторы утверждают, что достигнута высокая эффективность контроля адаптивного периода прохождения импульса для измерения низкочастотных вибраций [67].

Имеется публикация, в которой представлена информация о СК, способной контролировать деформацию строительных конструкций автотранспортного туннеля [68]. Данная СК основана на распределённом волоконно-оптическом тензодатчике и использует метод контроля - рассеяние Бриллюэна. СК использует лазер с длиной волны 1550 нм. Авторы заявляют, что проведены испытания СК в реальных условиях эксплуатации строительных конструкций. Представленная система использована для определения распределения напряжений вдоль двух боковых стен железнодорожного туннеля длиной 200 метров. Туннель разделен

на восемь участков, которые имеют стыки с неравномерным расстоянием, в среднем длина каждого сектора была около 25 метров.

Есть сведения о применении ВОД для охраны периметров от несанкционированного доступа [69]. Волоконно-оптические системы охраны достаточно востребованы на рынке и обладают рядом преимуществ в сравнении системами охраны, основанными на использовании электрического тока или радиосигналов [70]. Преимущества использования ВОД в системах охраны периметров от вторжения техники несанкционированного доступа уже были рассмотрены автором диссертации в ранних работах [70,71], частично идеи, рассмотренные в работах [69-71], так как предлагаемый АПКТК должен обеспечивать несколько функций и в частности охраны ВОК от НД. Поэтому указанные работы представляют определенную ценность для изучения. Для нормальной работы схемы нужно, чтобы один ВОД с большей чувствительностью должен быть установлен вблизи с оптическим разъемом, а второй ВОД с меньшей чувствительностью был рядом с клеммной коробкой, имел наименьшую чувствительность к вибрации. Расчет расстояния до места механического воздействия осуществляется путем вычисления разности выходных сигналов к их сумме. Система способна распознавать полезные сигналы и помехи. Авторы отмечают, что вибрации могут стать причиной для ложного срабатывания СК.

Можно рассмотреть еще один вариант СК, представленный в источнике [72]: это наиболее близкая СК по своему назначению, так как предназначена для контроля технического состояния (КТС) силовых электрических кабелей, которые проложены под водой. Оптический сигнал от источника сначала проходит блок усиления, а затем фильтрации с использованием вейвлет-преобразования. Используется полоса пропускания источника излучения 100 ГГц. Световая волна проходит через оптический циркулятор и падает на чувствительный элемент (фотоприемник), проходя предварительно через ОВ, которые размещены на силовом электрическом кабеле.

Авторы заявляют, что данная система пригодна для контроля разностного сигнала фазочувствительной рефлектометрии с применением систем глубокого

машинного обучения. СК способна выполнять функции охранной системы периметра от несанкционированного доступа [73]. Место-положение определяется путем сравнения сигнала на входе и выходе. Со слов авторов, предложенная система предполагает применение системы глубокого обучения, без применения алгоритмов искусственного интеллекта СК не способна выдавать точные результаты и не будет различать помехи от истинного сигнала тревоги [73]. СК имеет достаточно большое количество устройств для повышения точности и надежности срабатывания, усложненная конструкция будет весьма дорогой в производстве.

Имеется информация о двух схемах СК, предложенных одними авторами, можно отметить их определенные достижения в точности измерений и достаточно высокой чувствительности, при фиксации нарушения целостности или изменений технического состояния протяженного объекта. Данную СК можно использовать для охраны периметров [74]. Авторы провели эксперимент для сравнения систем ф-OTDR и OTDR-интерферометрии. Авторы отмечают, что использование вращающихся зеркал Фарадея усложняет саму конструкцию и снижает ее надежность [74]. Рассмотрен случай использования рефлектометра С-OTDR [74]. В случае применения оптического рефлектометра для контроля оптических сигналов, которые обычно генерируются в форме импульсов, которые подаются в ОВ с определенным периодом, для определения переходных процессов при обратном рассеянии. По словам авторов, данный метод позволяет функционировать для определения колебаний в ВОД, используемых для контроля технического состояния протяженных объектов. Отличием от обычных систем ф-OTDR, сигналы, поступающие от фотодетекторов, будут меньше, это позволяет за малый период времени получить более точные данные. Авторы признают, что основным недостатком является сложность компоновки системы и вычисление воздействий. Может быть некорректным применение данных систем в среде с большим количеством случайных внешних воздействий. Эта СК предназначена для мониторинга технического состояния различных по протяженности объектов, длина измерительного канала составляет максимально 75 км [75]. Был

использован лазер с длиной волны 1480 нм. Оптический сигнал преобразуется при помощи телекоммуникационного устройства WDM в оптический сигнал, с длиной волны 1550 нм. Авторы тоже утверждают, что необходимо использовать возможности искусственного интеллекта и машинного обучения, это позволит уменьшить проблемы связанные с протяженными помехами и шумами ОВ, для улучшения различных параметров работы системы. Использование интерферометров имеет широкое распространение, поскольку способно точно работать, однако традиционные методы не подразумевают решение по устранению помех. Основными признанными недостатками интерферометров при их применении являются их конструктивная сложность, большие размеры и высокая стоимость, а также маленькое разрешение. Интерферометры существенно уступают оптическим рефлектометрам по разрешающей способности и точности определения места механического воздействия или повреждения. В дальнейших исследованиях предлагаются более оптимальные варианты для реализации системы охраны кабелей относительно измерительного прибора.

В статье, посвященной охранам системам [76], приводится информация о том, что можно использовать возможности нейронной сети для устранения помех и нежелательных возмущений (помехи, созданные человеком, ветром, механическим перенапряжением, температурой). Авторы поясняют, что для устранения помех и различных возмущений обычных поляризованных датчиков нейронной сети может быть недостаточно, нужно еще применять аппаратные методы. В некоторых СК нейронная сеть позволяет установить точную природу воздействия. Помехи фиксируются посредством различения соседних измерительных трендов оптического сигнала для системы Ф-OTDR. Динамические сигналы при подаче импульсов можно контролировать с помощью периодических накоплений и хранения данных в определенные моменты времени.

В источнике [77] авторы применяют 3-слойную сеть BP ANN для автоматического определения тревожных событий. Со слов авторов, данный метод является наиболее эффективным для отделения шума от полезного сигнала

и определения реального вторжения. Систематические воздействия и воздействие окружающей среды вызывали бы одинаковую пространственную тревожную реакцию и приводили бы к росту помех в высокочувствительной системе Ф-OTDR. В статье [78] предлагается аналогичная СК, в которой используется нейронная сеть и ВОД распределенного акустического зондирования FDA. В статье [79] представлены результаты по созданию СК для мониторинга целостности трубопровода. Авторами предлагается метод распознавания временных последовательностей и интеллектуального анализа полученных данных, при помощи скрытых марковских моделей (НММ). Полученные авторами экспериментальные данные полевых испытаний показали, что точность распознавания составляет 98,2% для пяти наиболее часто встречающихся типовых событий, связанных с повреждением трубопроводов. В статье [80] авторы предлагают решить задачу формирования низкой скорости обнаружения событий при помощи OTDR, для этого нужно применять метод машинного обучения, когда сначала сигнал от OTDR обрабатывается с разницей n -го порядка, а затем дифференциальный сигнал подавляется. Для классификации классификатора возмущения при машинном обучении [81] используются опорные векторы SVM. В [82] с помощью CNN определяют дальность целевого события от оптического волокна. Для этого используют матрицы пространственно-временных данных, собранные системой, которая далее фильтруется тремя различными полосовыми фильтрами для формирования изображений RGB. Результаты эксперимента показали точность классификации 86%, предложенный метод может определить как тип события, так и радиальное расстояние до него. Рассмотренные ранее статьи, в которых использовались методы машинного обучения и искусственный интеллект для улучшения точности и надежности работы СК, показывают разные результаты: в источнике [83] авторы достигли точности классификации событий на уровне 92.4%, в источнике [84] авторы достигли точности классификации событий на уровне 96.7%, в источнике [85] авторы достигли точности классификации событий на уровне 94,54% с использованием CNN в качестве инструмента для идентификации.

Проанализировав возможные системы с применением машинного обучения, классификаторов и других видов нейронной сети, можно заключить, что для данной задачи лучшего всего подходят свертывающиеся, по причине того, что, благодаря им, можно легко обрабатывать изображения в виде спектрального анализа и рассматривать графики.

1.3 Использование волоконно-оптических датчиков в различных областях промышленности с анализом международного опыта и их классификация

ВОД могут обеспечить измерения с высокой степенью точности различных параметров (деформация, механические напряжения, давление, вес, вибрации и др.), а также контролировать техническое состояние протяженных крупномасштабных объектов (плотины, мосты, насыпи, горнорудные карьеры и др.), к этим объектам можно отнести и ВОК [86]. Достоинства ВОД известны достаточно давно, они только могут быть распределенными и квази-распределенными по своей чувствительности. Невысокая стоимость ОВ по сравнению с медной жилой позволяет работать на значительных дистанциях и иметь измерительные каналы протяженностью в десятки километров, при этом стоимость ОВ и оптического оборудования ежегодно снижается, а его потребительские свойства улучшаются. ВОД имеют низкое энергопотребление и способность работать на значительном удалении от блока обработки данных. Современное ОВ имеет очень низкое затухание оптического сигнала, в отличие от электрического проводника. ОВ в отличие от медных проводников не подвержено окислению [87]. ОВ используются в распределенных и квази-распределенных системах контроля геотехнического состояния горных выработок, их использование повышает уровень безопасности ведения горных работ [88]. На основе ВОД разработаны охранные системы периметров и рубежей различного типа [89]. ВОД используются в аэрокосмической и в нефтегазовой промышленности, ВОД имеют значительные преимущества по отношению к

электрическим датчикам. Есть сведения о применении ВОД в области повышения безопасности добычи мрамора открытым способом [90]. ВОД используются при контроле вибраций и акустического воздействия [91]. В источнике [92] представлена информация для ученых - инженеров о сфере применения ВОД и их возможностях. Автор также отмечает уменьшение стоимости ОВ и развитие инструментов измерения. Основными методами для измерения внешних воздействий являются (TW-COTDR), (PSP-BOTDR), (PPP-BOTDA), (BOTDA), (BOTDR), OBR (OFDR) или методы, основанные на измерении потерь в оптическом волокне, вызванных Бриллюэновским рассеянием [93] данные датчики можно использовать в нефтегазовой и горнодобывающей промышленности. Распределенные ВОД используются для статического и динамического контроля различных объектов [93]. В настоящее время широкую популярность приобретают ВОД, основанные на эффекте решеток Брэгга [94, 95], имеются сведения что проведены лабораторные испытания ВОД с использованием ВРБ для контроля горного давления и смещения кровли выработок угольных шахт Китая. Распределенный ВОД был использован для контроля механических напряжений и деформации стального железнодорожного моста [96]. Существуют ВОД, созданные на основе гибридного интерферометра Фабри-Перо для одновременного измерения деформации и температуры [97, 98], данные датчики можно использовать, например, для контроля деформации и температуры угольных пластов. Существуют ВОД, разработанные на совершенно новой основе перспективных методов для контроля и измерения изгиба, деформации и температуры на основе спиральных волоконных решеток с большим периодом [99], которые можно использовать в строительной индустрии, также для данной сферы деятельности разработаны лабораторные образцы уникальных ВОД на основе фотоакустического эффекта для измерения коррозии арматуры [100]. Имеются публикации, где разрабатываются ВОД для использования их в угольных шахтах, для контроля горного давления и опасностей обрушения горных выработок [101]. Аналогичная работа по использованию ВОД в горнодобывающей промышленности. Авторы предлагают

использовать ВОД для контроля целостности кровли горной выработки. Их решением является использование ВРБ, для их стабильной работы требуется температурная коррекция [102]. В Китае достаточно большое количество исследований проводится для разработки и использования ВОД в угольных шахтах, так как ВОД имеют ряд неоспоримых достоинств по сравнению с электрическими датчиками, также атмосфера угольной шахты взрывоопасна и поэтому ВОД идеально пригодны в данных условиях, так как не используют электрический ток для своей работы. Авторы разрабатывают ВОД на основе ВРБ, который способен контролировать смещение горных пород кровли выработки [103]. Также есть сведения о разработке ВОД на основе маломодового ОВ для контроля смещения горных пород выработок шахт и карьеров. У авторов имеются лабораторные образцы, которые они планируют испытать в условиях горнодобывающего предприятия [104]. Есть публикации, посвященные разработке ВОД, который контролирует деформации железобетонных строительных конструкций. Авторы провели анализ дополнительных потерь в ОВ, встроенных железобетонную строительную конструкцию при ее нагружении. Предлагаемый ВОД основан на ВРБ [105]. Помимо горнодобывающей, нефтегазовой и строительной промышленности ВОД используются для контроля сейсмической активности. Имеются работы, посвященные использованию ОВ в качестве датчика для контроля сейсмической активности земли [106, 107]. Еще одним промышленным использованием ВОД является энергетика. В статье [108] авторы выполнили сравнительный анализ интерферометрических ВОД по сравнению с электронными акселерометрами, которые применяются для измерения вибраций внутри мощных электрических трансформаторов высокого напряжения. Ученые из Азии предлагают ВОД, способные контролировать напряженно-деформированное состояние (НДС) различных конструкций, что востребовано во многих отраслях промышленности [109]. Имеется работа ученых из России, которые разработали ВОД для контроля смещения горных пород карьера или разреза. Предлагаемый ВОД основан на использовании волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, который будет выполнять функцию

длиннобазного деформометра грунта. Это достаточно актуальная тема для горнодобывающей промышленности, так как большая часть полезных ископаемых добывается открытым способом. В данном случае устойчивость бортов и откосов карьера имеет важное значение [110]. Ученые из Китая предлагают свой метод обработки данных, полученных от ВОД. Разработан метод улучшения демодуляции длины волны ВРБ путем каскадирования генеративно-состязательной сети и плотной нейронной сети [111]. В случае если нужно контролировать вибрацию машин и механизмов, то можно применить адаптивный метод периода импульса для измерения низкочастотной вибрации с помощью фазочувствительных рефлектометрических систем на основе интенсивности [112]. Отдельный интерес вызывают распределенные ВОД, так как они достаточно эффективно производят измерения одновременно в нескольких десятках точек, а также способны контролировать протяженные объекты, например, электрические или телекоммуникационные кабели, что достаточно близко к настоящей диссертации. Ученые из Китая предлагают распределенное оптоволоконное зондирование и метод обработки данных сборных при проведении контроля технического состояния протяженного объекта. Данный ВОД может быть использован во многих сферах деятельности человека, в том числе и телекоммуникации для контроля технического состояния оптических кабелей [113]. Даже использование нейронных сетей не решает всех проблем с использованием ВРБ. Авторы разработали метод подавления шума в режиме реального времени Бриллюэновского оптического анализатора временной области [114]. ВОД могут использоваться для контроля технического состояния железобетонных фундаментов [115], это позволит на ранней стадии установить изменение НДС фундамента или другой монолитной железобетонной конструкции и оповестить о сложившейся проблеме. Также использование ВОД позволит установить место повреждения железобетонного фундамента, где в нем образовалась и растет трещина. Найдены две статьи, где ученые из Китая предлагают контролировать разрушение подземных сооружений при помощи ВОД, которые в своей основе имеют ВРБ [116, 117], также есть публикации,

связанные с контролем давления пластов горных выработок [118-120]. В данных статьях рассматриваются различные проблемные вопросы разработки и внедрения ВОД в горнодобывающую промышленность. Рассмотрено использование технологии распределенного оптоволоконного зондирования для контроля деформации горных пород подземных выработок угольной шахты. Все работы направлены на обеспечение безопасности ведения горных работ и повышение уровня охраны труда на угольных шахтах. Можно отдельно выделить группу статей, посвященных разработке и использованию ВОД на основе ВРБ, это достаточно новое и, можно сказать, перспективное научное направление, но пока имеющее малое промышленное освоение из-за технической сложности и высокой стоимости СК, в которых используются ВОД на основе ВРБ [121-124]. Также можно выделить ряд интересных публикаций, посвященных контролю технического состояния железобетонных конструкций и фундаментов, гидротехнических сооружений, а также протяженных объектов, при помощи распределенных ВОД [125-130]. ВОД пригодны для использования во всех отраслях промышленности, так как способны функционировать аналогично электрическим датчикам. ВОД имеют ряд преимуществ по сравнению с уже классическими электронными и электрическими датчиками. ВОД способны измерять или контролировать любые физические параметры производственного технологического процесса. Так как сейчас в мире достаточно востребованы цифровые системы мониторинга технического состояния протяжённых объектов, то ВОД отвечают всем требованиям современности, так как используют в своей основе цифровые и оптические технологии. Важным свойством современных СК является своевременность реакции и возможность проведения ранней диагностики состояния контролируемого объекта. Например, если оптический кабель стал провисать до более критического уровня, то его чрезмерное растяжение со временем приведет к повреждению ОВ. Соответственно если имеется возможность ранней диагностики с помощью методов автоматического контроля дополнительных потерь, можно выявить опасный участок. Если такой возможности нет, то только один периодический осмотр трассы или измерения не

обеспечит длительной эксплуатации оптического кабеля. Соответственно нужно будет его ремонтировать или менять, неся при этом финансовые и трудовые затраты. АПКТК способен существенно повысить эффективность эксплуатации оптических кабелей и снизить затраты на их ремонт. Вторым моментом является своевременная реакция на НД или попытку кражи оптического кабеля, при этом применение электрических датчиков является невозможным, так как необходимы распределенные или квази-распределенные датчики, это также позволит вывести датчики на новый уровень технического развития. ВОД отвечает требованиям сокращения металлоёмкости и энергоёмкости для современных систем измерения и контроля. В системах телекоммуникации населенных пунктов и промышленных предприятий для контроля технического состояния оптических кабелей, а также их охраны от НД нужны эффективные и не дорогие технические решения. Существующие методы контроля внутри зонных оптических кабелей не отвечают требованиям современности и не решают сложившихся проблем. Методы, разработанные в прошлом веке непригодны для высокотехнологичной сферы телекоммуникации. Например, периодический осмотр трассы электромонтером или проведение периодических измерений с помощью рефлектометра или тестера не обеспечат полного охвата и решения проблемы. В современных условиях необходимо вести автоматический контроль в режиме реального времени и в круглосуточном режиме с фиксацией измеряемых параметров в машинной памяти. Конечно, нельзя отрицать существования средств контроля измерения, но они пока являются периодическими и их эффективность во многом зависит от человеческого фактора, а также для проведения контроля требуются высококвалифицированные специалисты и наличие самих приборов, которые достаточно дороги. Также специалистам нужно попасть на объект, провести измерения, сделать заключение и выдать рекомендации. Все это сопряжено с финансовыми затратами и расходом рабочего времени. Например, после проведения измерений специалистами и выдачей положительного заключения о техническом состоянии оптического кабеля, на следующий день могут начаться процессы его деформации и разрыва ОВ.

Современное развитие производства требует использования интеллектуальных технологий. Предлагаемый АПКТК использует искусственный интеллект для обработки данных, чем полностью отвечает задачам Индустрии 4.0.

Различные образцы ВОД уже используются в промышленности, их разработка и изготовление начаты еще в конце 90 годов прошлого века. Изучив рассмотренные в обзоре источники литературы, можно сказать, что ВОД не завершили своего окончательного развития. Ученые разных стран работают над совершенствованием ВОД и предлагают новые конструкции. Также совершенствуются методы и средства обработки данных. Ежегодный научный интерес к разработке и исследованию ВОД растет. Также развиваются материалы и технологии, появляются новые методы контроля и измерения, а также обработки данных, это позволяет совершенствовать ВОД и расширять сферу их применения. Учёными - разработчиками учитываются ошибки предшественников, которые доставили немало разочарования в данном направлении техники, были, конечно, и определенные успехи, которые сейчас развиваются. Достаточно много информации о конструкции ВОД, принципе их работы, а также видах и назначении можно найти в источниках [10, 131-135]. Были подробно изучены материалы, представленные в источниках [11, 131-135], которые содержат достаточно ценный мировой опыт разработки ВОД для различных отраслей промышленности. Указанные источники подготовлены как отечественными, так и зарубежными авторами. Подбор источников [5, 131-135] выполнен с учетом длительного развития ОВ, ВОК и ВОД в течение 30 лет, что позволяет выполнить их классификацию, разделить на определенные группы. Информацию о ВОД можно получить в открытых источниках в интернете, но доверять непроверенным источникам нельзя, данную информацию можно воспринимать для ознакомления, а вот точные сведения можно получить только из проверенных источников. ВОД применяются во многих областях науки и техники, например для измерения давления, концентрации веществ и газов, измерения скорости вращения и угла поворота, контроля механических напряжений и деформаций, измерения нагрузки или веса, контроля электрических

параметров и так далее. Также имеются варианты ВОД, предназначенные для измерения давления, температуры, уровня жидкости, ускорения, вибрации, положения в пространстве. ВОД применяются в нефтегазовой, металлургической, строительной, аэрокосмической отраслях для контроля параметров технологического процесса и технического состояния оборудования, так как имеют высокую точность и стабильности, устойчивость к электромагнитным помехам. ВОД обладают возможностью бесконтактного измерения [10, 131-135]. Хотелось уделить внимание важной сфере применения ВОД, а именно системе охраны периметров и объектов различного назначения, было изучено достаточно много работ. Рассмотрены статьи отечественных и зарубежных ученых, в которых представлено достаточно много информации о разработках и испытаниях систем охраны, использующих в качестве чувствительного элемента ОВ [136-139]. В указанных статьях рассмотрены достоинства и недостатки как волоконно-оптических систем охраны, так и электрических. Достаточно подробно раскрыты методы исследования и конструктивные схемы исследуемых систем.

Авторы приводят результаты исследований лабораторных и опытных образцов. Это достаточно емкая и обширная область использования ВОД, с определенной перспективой развития. Авторы приводят информацию о внедренных разработках и прошедших успешные испытания. Представлены результаты эксплуатации волоконно-оптических систем охраны. Рассмотрены также обзорная статья, в которой представлены сведения о существующих волоконно-оптических системах охраны (ВОСО), а также перспективные разработки [140]. Так как АПКТК обеспечивает не только контроль технического состояния оптического кабеля, но и его сохранность и защиту от НД, нужно уделить внимание этому вопросу тоже. Имеется определенный личный задел, а также публикации, связанные с разработкой охранных систем с использованием распределенных и квазираспределённых ВОД [141,142]. ВОСО могут охранять от несанкционированного вторжения периметры любых объектов (военные базы, электростанции, аэропорты и так далее). Первые ВОСО уже были созданы в конце прошлого века. Первый патент на ВОСО был получен в США (1977 г.). С

того момента ВОСО прошли достаточно значительный и результативный путь своего развития, от идеи до внедрения. В различное время в мире производились и реализовывались на рынке более десятка достаточно известных мировых брендов. Наиболее успешной и технологичной на американском рынке была продукция фирмы Fiber SenSys. Продукция достаточно дорогая и для частного пользования не доступна, поэтому данная фирма работает с крупными промышленными предприятиями или государственным заказом. Имеются аналогичные производители по всему миру, например, Magal (Израиль); Senstar-Stellar (Канада), YOFC (Китай). Представленные ВОСО имеют различные технические характеристики и принципы действия, соответственно разные возможности, а также достоинства и недостатки. Каждая ВОСО разрабатывается под конкретный объект. Подробную информацию об их конструкции можно получить из источников [141,142]. Условное обозначение различны по зоне чувствительности ВОД показаны на рисунке 3 [141,142].

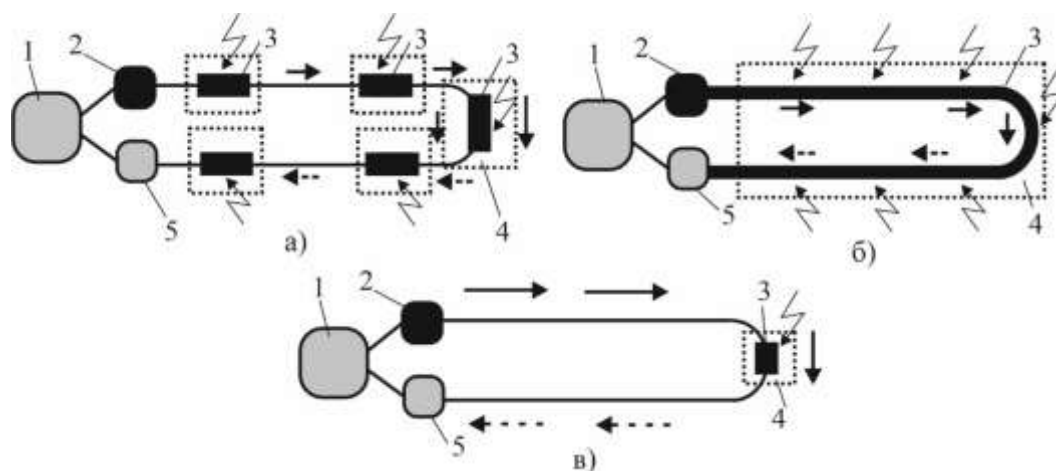


Рисунок 3 - Типы волоконно-оптических датчиков

а – квазираспределенный ВОД; б – распределенный ВОД; в – точечный ВОД.
1 – устройство обработки данных и вывода информации на экран; 2 – источник излучения; 3 – область чувствительности ВОД; 4 – объект контроля; 5 – фотоприёмник.

Имеется ряд производителей из России, которые используют ОВ для построения распределенного ВОД и последующего его использования для работы ВОСО. Продукция различна по стоимости, можно выделить фирму ООО «Прикладная радиофизика» с торговой маркой «ВОРОН», также есть другие

марки ВОСО: «Дунай», «Волк», «Гюрза», которые имеют сходство с зарубежными аналогами.

Найдена достаточно интересная публикация по обзору существующих и перспективных охранных систем на основе ВОД [143]. В статье рассматривается ВОСО на ВРБ для охраны периметра. Автор делает только теоретические исследования, демонстрационный макет ВОСО на ВРБ. Предлагается использовать ОВ с сохранением поляризации типа PANDA, для получения максимальной чувствительности ОВ к внешнему воздействию. ВОСО применяется для охраны периметра и одинаково эффективно действует на всем протяжении охраняемого участка. ВОД размещается в траншее на глубине около 3-8 см или на ограждении.

В источнике [143] представлена информация о разработанном ВОД, который в своей конструктивной основе имеет полую капиллярную трубку с тремя плотно закрытыми ОВ. Авторы раскрывают особенности конструкции ВОД для многоцелевого и многовалентного зондирования, который обладает потенциалом для интеграции большего количества методов обнаружения и измерения в небольшом пространстве, что в значительной мере способствует оптимизации монтажа и финансовых затрат. Разработанный ВОД проходит испытания в специально разработанной камере высокого давления и высокой температуры [143]. ВОД позволяет контролировать измерение температуры, давления, изгиба и вибраций. При анализе литературы обнаружена публикация [145], в ней рассматриваются ВОД для контроля деформации. ВОД разработан для измерения деформации любых строительных конструкций, даже если они находятся при сильном электромагнитном воздействии или в условиях повышенной опасности, связанных с пожаром, взрывом, радиации. Принцип действия ВОД основан на эффекте отражения света в элементе, жестко связанном с объектом, который подвергается контролю. Коэффициент отражения меняется в зависимости от величины деформации объекта. В большей мере производятся ВОД для точечного измерения, так как распределенные ВОД достаточно сложны по конструкции и имеют высокую стоимость, поэтому имеют определенную

специфику применения в промышленности. В мире достаточно много различных производителей, около двух десятков, из стран Европы, Америки и Азии, есть производители на территории России, которые делают несколько видов ВОД для нефтедобывающей, авиакосмической и химической промышленности. Например, ВОД для измерения давления можно приобрести на рынке, который производится под брендом АККЕ (Китай) или Omron (Япония). Есть ВОД от производителя Keyence типа FU-12 (Китай), который является аналогом тензодатчиков и предназначен для измерений деформации и температуры. Производится ВОД для контроля состояния строительных железобетонных конструкций в непрерывном режиме. У многих датчиков есть зависимость результатов измерений от температуры, поэтому необходимо выполнять коррекцию при измерениях. Имеются опытные образцы ВОД, созданные на основе решеток Брэгга, которые можно использовать в различных областях промышленности: аэрокосмической, строительной, нефтегазовой. Далее будет выполнена классификация ВОД на основании полученных сведений из источников [5,10,131-145], с учетом специфики их применения, конструкции и мирового опыта производства. В классификации будут рассмотрены как промышленные образцы, так и перспективные разработки, которые представлены только лабораторными образцами.

В отличие от электрических датчиков, ВОД являются пожаро-взрывобезопасными, так как могут работать непосредственно в газовой атмосфере, так как не создают угрозу взрыва или пожара [131-135]. Срок службы ВОД, по разным сведениям, может быть до 50 лет [114-118], но даже срок в 20 лет для датчика вполне приемлемый. ВОД могут иметь различную чувствительность: точечная, квазираспределенная, распределенная, что недостижимо для электрических датчиков. ВОД позволяют выполнять одновременные измерения сразу нескольких параметров. ВОД имеет в своей основе ОВ, которое одновременно используется как чувствительный элемент и как направляющая система передачи информации. В отличие от кабеля с медными жилами, у ОВ достаточно низкий коэффициент затухания сигнала, так как по стеклянной

сердцевине передается световая волна и используется внутреннее отражение, а не электрический сигнал. ВОД имеет низкое энергопотребление в сравнении с медными проводниками. Если передать электрический сигнал по контрольному кабелю на расстояние в 100 км, что достаточно сложно из-за сопротивления провода, то для ОВ это расстояние вполне преодолимо [131-145]. ВОД основаны на трех основных принципах действия, это три разные конструкции, их можно условно разделить на три группы, рисунок 1А, Приложение А [131-135]. Простые по своей конструкции ВОД используют методы контроля интенсивности световой волны. ВОД может быть основан на использовании различного типа ОВ, одномодовое, многомодовое и специальное [131-135].

ВОД типа 1 использует в качестве чувствительного элемента ОВ, которое подвергается механическому воздействию, что приводит к возникновению различных эффектов: Фарадея, Керра и упругого. Данные ВОД используются для контроля давления, веса, нагрузки и деформации. Есть ВОД, в которых для расширения их измерительных возможностей или повышения чувствительности используются ОВ специального типа, например, флуоресцентные или панда. ВОД типа 2 в своей основе имеет иной чувствительный элемент, который конструктивно сложнее и содержит несколько деталей, например, пружины или стержни. В данном случае чувствительным элементом является уже не само ОВ, как у ВОД типа 1, а сам измеряемый объект. Его принцип действия основан на изменении параметров световой волны, проходящей через сердцевину ОВ, при изменении уровня воздействия меняются свойства световой волны, здесь использован принцип «физическая величина - свет». ВОД типа 3 отличается тем, что его чувствительный элемент устанавливается на торцах двух ОВ, теперь чувствительным элементом может быть отражающий элемент (зеркало) или мембрана, возможно использование упругого элемента. Данный ВОД основан на принципе механического перемещения оптического элемента (отражающего) под действием приложенной извне силы. ВОД, помимо промышленного применения, могут использоваться в общих сферах или смежных областях. ВОД используются для мониторинга окружающей среды, для обеспечения безопасности проведения

различных работ, для мониторинга зданий и сооружений. Область промышленного применения ВОД показана на рисунке 2А (Приложение А). ВОД можно подвергнуть общей классификации по виду чувствительности и контроля оптических параметров, рисунок 3А (Приложение А) [131-135]. ВОД могут измерять и контролировать различные величины, согласно полученной информации сформированы приоритеты по их использованию и определены направления применения, рисунок 4А (Приложение А) [131-135].

1.4 Постановка цели и задач диссертационной работы. Формирование основной научной гипотезы и идеи

В данной работе упор делается на использование принципиально новых методов оптико-цифрового анализа параметров светового пятна при помощи фотоматрицы высокого разрешения и интеллектуального АПК на основе использования распределенных или квази распределенных ВОД, а также использует цифровые и энергоэффективные технологии, которые отвечают задачам Индустрии 4.0. Диссертация направлена на решение достаточно известной задачи с помощью совершенно нового метода контроля технического состояния ВОК. Предложенный далее метод не использует оптический интерферометр или рефлектометр, а также эффект решеток Брэгга, так как эти методы уже достаточно изучены, а их практическое применение - в системах телекоммуникации для контроля технического состояния оптических кабелей.

Известная проблема, связанная с повреждением ВОК и НД, уже обсуждается достаточно давно и решена еще не в полном объеме, хотя ученые разных стран работают над решением отдельных направлений, но вот комплексного решения пока нет. Предлагаемый АПК позволит комплексно решить сразу две проблемы: повреждение ВОК и его присоединений, а также защиту от НД. Это, с одной стороны, достаточно сложная задача, но, с другой стороны, объединение двух задач и использование синтеза позволят создать ПАК способный решать именно широкий круг задач, что позволит сократить стоимость

его эксплуатации, а использование более простой конструкции ВОД, которая представляет собой сам ВОК, обеспечит серьезное снижение затрат на первоначальные вложения. АПК также сможет контролировать техническое состояние не только ВОК, но и оптических муфт, кроссов и другого оптического оборудования. Это комплексное решение сразу нескольких задач, в чем и заключается новизна подхода, которая не найдена в анализируемых статьях сторонних авторов. Не нужно забывать, что более простой по конструкции ВОД, а также разработанные собственные методы и программное обеспечение позволят достичь высоких технико-экономических показателей системы контроля. Еще один момент, не найденный в публикациях зарубежных ученых. Он связан с адаптацией АПК к климатическим условиям России и Казахстана. Сформирована научная гипотеза, которая предполагает, что необходимо контролировать не только уровень дополнительных потерь и других параметров ОВ для установления факта НД, но и осуществлять контроль целостности оболочки волоконно-оптического кабеля, а также устанавливать зоны формирования микроизгиба как одного из признаков НД. Идея заключается в создании аппаратно-программного комплекса контроля дополнительных потерь и механических воздействий на ВОК, при этом датчиком является ВОК, а именно его резервные ОВ, которые не используются для передачи информации. Если же нет резервных ОВ, то можно использовать рабочие ОВ, для этого нужно использовать тестовый сигнал с другой длиной волны. В настоящий момент времени не существует подобных систем, которые бы одновременно несли несколько функций контроля и защиты от НД. Контроль дополнительных потерь ВОК позволит определить угрозу его разрыва, например, при подмыве основания или провисании (растяжении). При нарушении целостности присоединения в оптическом оборудовании тоже растут дополнительные потери, соответственно можно найти поврежденную оптическую муфту, сварное соединение или кросс.

Высокую актуальность получают цифровые интеллектуальные системы, которые могут с достаточно высокой точностью обеспечить непрерывный контроль технического состояния ВОК в режиме реального времени, а также

обеспечить его защиту от НД к передаваемой информации. Данная система контроля может быть использована для внутризонных или промышленных систем телекоммуникации. Также можно отметить, что система контроля может быть средством ранней диагностики повреждения ВОК и указать точное месторасположение его разрыва или точку повреждения оптического коммутационного оборудования. Ясно, что обеспечить контроль технического состояния протяженного объекта в несколько десятков километров, которым является ВОК, невозможно с использованием точечных электрических датчиков по техническим причинам, это будет экономически не оправданно. Точечные электрические датчики не могут быть распределенными или квазираспределенными, с их помощью можно установить точку повреждения ВОК. ВОД в отличие от электрических датчиков не требуют для своей работы наличия электрической сети или источника постоянного тока, так как по ОВ передается только излучение (мода), оно является энергопассивным. ВОД уже встроен в ВОК и является его частью, так что он защищен от внешних воздействий окружающей среды, соответственно нет проблем с его эксплуатацией. В основе данной диссертации лежит использование распределенных ВОД, выполненных на базе ВОК. У ВОД имеет ряд неоспоримых преимуществ перед электрическими датчиками, например, ВОД может осуществлять контроль параметров только в одной точке измерения или быть квазираспределенным и распределенным средств контроля технического состояния протяженных объектов. При этом ВОД не могут быть источником взрыва газовой атмосферы или спровоцировать пожар.

Основной научной гипотезой данной диссертационной работы является то, что можно использовать в качестве ВОД резервные ОВ, одно ОВ или два последовательно соединённых одномодовых ОВ, которые находятся внутри ВОК и являются неотъемлемой частью его конструкции. По ОВ пропускается световая волна диапазона 650-1550 нм и на выходе из ОВ устанавливается фотоприемник высокого разрешения. Сформированное пятно подвергается оптико-цифровому интеллектуальному анализу, и все изменения параметров светового пятна Пуассона фиксируются. При внешнем силовом воздействии на ВОД происходит

изменение интенсивности светового пятна из-за сформировавшихся в ОВ дополнительных потерь, что позволяет при помощи алгоритмов искусственного интеллекта обработать данные, исключить помехи и выдать точные численные значения деформации ВОК. Поэтому в настоящей работе предлагается принципиально новый АПК для контроля технического состояния ВОК по дополнительным потерям оптической мощности, при этом в качестве ВОД используется ОВ, находящееся внутри ВОК в виде резервных волокон, что существенно упрощает конструкцию ВОД и снижает его стоимость. Принципиальное отличие и новизна предлагаемого научно-технического решения доказываются отсутствием аналогов среди систем контроля и диагностики ВОК, которые могли бы иметь схожий принцип действия, основанный на контроле дополнительных потерь, возникающих при микроизгибе ОВ. Предлагаемый метод основан на возникающем фотоупругом эффекте, сформировавшемся при внешнем силовом воздействии (ВСВ) на ОВ, а также используется одновременный метод контроля оптического рассеяния оптического излучения конденсированными средами по методу Рэлея. 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.

Цель работы - создание новой методики контроля дополнительных потерь, возникающих в оптических кабелях, и рассеяния оптического излучения Рэлея при механических воздействиях на них на основе аппаратно-программного комплекса для повышения эффективности и безопасности эксплуатации.

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

- разработать физико-математическую модель оптико-механических процессов в оптическом волокне при его деформациях и выполнить компьютерное моделирование внешнего силового воздействия на ВОК при помощи компьютерного моделирования для разработки;

- разработать аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния дополнительных потерь (АПКТК) и рассеяния, оптического излучения Рэлеевского рассеяния, при этом ВОК должен быть распределенным датчиком;
- выполнить экспериментальные исследования опытного образца аппаратно-программного комплекса;
- разработать методику оптико-цифрового контроля дополнительных потерь при помощи АПКТК и провести практическую апробацию.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Выполнен анализ публикаций, посвященных волоконно-оптической технике и технологиям, ВОК, ОБ, ВОД, которые размещены в наукоемких базах данных РИНЦ, КазБЦ, WoS и Scopus. Проведен обзор и анализа современного состояния развития систем контроля технического состояния различных объектов с использованием ВОД. Сформированы основные гипотезы и выдвинуты идеи, а также определены пути их практической проверки. Сформулирована актуальность проведения исследований и разработки АПКТК для контроля технического состояния оптических кабелей систем телекоммуникации по дополнительным потерям. Рассмотрены основные проблемы и выполнена оценка уровня научных знаний в области использования ВОД.

2. Выполнен выбор схемного решения на основании обзора существующих систем контроля технического состояния протяженных объектов с использованием волоконно-оптических датчиков. Установлено, что применение интеллектуальных систем и искусственного интеллекта позволяет снизить влияние помех на результаты измерений. ВОД, которые созданы по схеме интерферометра Маха–Цендера, имеют проблемы в точности измерений при изменении внешней температуры.

3. Рассмотрено использование ВОД в различных областях промышленности с анализом международного опыта и выполнена их классификация.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЯХ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

2.1 Методы исследования и выбор среды моделирования

Методология научных исследований построена на применении общенаучных методов [146], которые используются в различных областях науки, например, наблюдение, анализ, построение гипотезы, формирование идеи и концепции, формулирование проблемы, выбор средств познания, общее понятие смысла и этапов проведения научных исследований и др. Методология исследований определяет: характеристики (особенности, принципы, нормы, условия); временную структуру (фазы, стадии, этапы); логическую структуру (объект, предмет, методы, средства) [146]. Содержание методологии будет постепенно раскрыто по мере использования по разделам данной диссертационной работы, но основные принципы и методы взяты из [147]. Выбранные методы исследования разделяются на два типа: теоретические (анализ, синтез, сравнение, обобщение, моделирование) и эмпирические (изучение и исследование объекта, в том числе времени, эксперимента, опытной работы).

В ходе выполнения диссертации соблюдены нормы научной этики, а также учтены авторские права сторонних ученых, результаты исследования которых использовались или цитировались с обязательной ссылкой на их работы (публикации). Исследования разделяются на фазы проектирования и технологическую [147]. Сначала выдвигаются научные гипотезы и идеи, формируются цель и задачи, также определяются объект и предмет исследования (Глава 1). При этом технологическая фаза будет разделена на стадию проведения исследований (теоретический и эмпирический этап) и стадию оформления результатов (обработка данных, оформление и апробация результатов). Методами

апробации результатов будет выбрано: публичное выступление перед специалистами на технических советах организаций сферы телекоммуникации; выступление с докладом на научных конференциях различного уровня; выступление на научном семинаре в организации, в которой была подготовлена диссертация. Оформление результатов будет осуществляться путем публикации докладов в сборниках конференций и в рецензируемых научных журналах различных баз данных. После выдвинутые гипотезы проверяются практическим путём, при помощи численного моделирования и практического эксперимента. Далее будет выполнена обработка полученных экспериментальных данных и построены графики зависимостей, анализ и оценка новых научных знаний с определением последующего решения о корректировке моделей и образцов либо созданием других улучшенных вариантов. Будет выполнена статистическая обработка данных и определены критерии оценки достоверности полученных результатов (объективность, адекватность, валидность, нейтральность) [148]. При выполнении данной диссертационной работы была использована информация из [149], из которой получены сведения о теоретических основах и практики научных исследований.

Теоретические исследования состоят из двух частей: математическое и компьютерное моделирование. Также был использован метод конечных элементов и компьютерного трехмерного моделирования с визуализацией. В качестве инструмента для моделирования были использованы пакеты прикладных программ ANSYS и COMCOL. При освоении программы ANSYS и изучении ее возможностей, а также приобретении навыков работы была использована информация, полученная из источников [150,151]. Данная программа обладает достаточно широкими возможностями и инструментарием для выполнения двух или трехмерного моделирования ВОК под нагрузкой, при этом возможно создание условий для растяжения, кручения и изгиба ВОК. Выполнялось исследование ВОК при его нагружении с выдачей численного результата НДС и визуализации картины распространения механических напряжений и деформации ВОК. Также отдельно выполнены аналогичные исследования, но объектом

нагружения был не BOK, а само ОВ. ANSYS является наиболее мощным средством расчета различных механических параметров твердого тела при его нагружении, в том числе позволяет выполнить численный расчет НДС при определенном уровне нагрузки с учетом шага изменения и направления. ANSYS имеет обширные возможности для численного моделирования практически любых направлений технических наук, а именно механики, электротехники, физики, оптики, газодинамики, теплотехники и так далее [150,151]. Можно сказать, что ANSYS широко используется как учеными, так и инженерами. Это достаточно эффективное средство для численного моделирования различных конструкций, устройств и процессов практически во всех областях науки или техники. Также при помощи пакетов прикладных программ ANSYS можно выполнять анализ как отдельных частей каких-либо конструкций или устройств, так и взаимосвязанных с работой физических процессов, а также решать сложные контактные задачи. Программа позволяет создавать 3D модели с возможностью введения значений их геометрических размеров и свойств материалов, которые использованы для создания 3D модели. ANSYS обладает множеством возможностей, например, выводом на экран компьютера визуализированной картины НДС, при этом можно детально рассмотреть картину НДС по осям. Аналогом ANSYS является программа COMCOL, это примерно равные по возможностям продукты. Из-за степени освоения программ ANSYS и COMCOL были реализованы разные задачи, например, COMCOL позволил моделировать оптические процессы и распространение световой волны по ОВ при его нагружении. При освоении программы COMCOL и изучении ее возможностей, а также приобретении навыков работы была использована информация, полученная из источников [152,153].

Полученные результаты теоретических и эмпирических исследований, теоретических и компьютерных экспериментов были обработаны с помощью компьютерной программы Wolframalpha, которая находится в открытом доступе. Данная программа позволяет проводить математическое моделирование [154]. Использован статистико–детерминированный метод построения многомерных

моделей, для проведения которого использована программа ANETR [155]. ANETR и Wolframalpha позволяют выполнить оценку достоверности результатов и установить значения отклонений и погрешности. Для построения графиков зависимости параметров и аппроксимации были использованы программы Wolframalpha, ANETR и Microsoft Excel. Был использован регрессионный анализ и t-критерий Стьюдента Стьюдента. ANETR имеет некоторые требования к плану многофакторного эксперимента. Во-первых, необходимо точно определить минимальное число необходимых опытов. Во-вторых, необходимо достичь высокой достоверности полученных результатов.

Программа ANETR [155] реализована на языке ТУРБО_ПАСКАЛЬ и является средством обработки экспериментальных данных, находит частные (парные) зависимости из числа следующих пятнадцати уравнений, каждому из которых присвоен порядковый номер: 1. $y=A+Bx$; 2. $y=Ae^{**}(Be^{**}(Cx))$; 3. $y=A+B/x$; 4. $y=Ax^{**}b$; 5. $y=Ae^{**}(bx)$; 6. $y=x/(A+Bx)$; 7. $y=1/(A+Bx)$ 1; 8. $y=Ax^{**}b+C$; 9. $y=Ae^{**}(bx)+C$; 10. $Y=(C+Dx)/(A+Bx)$; 11. $y=Ax^{**}2+Bx+C$; 12. $y=A+B\lg x$; 13. $y=Ae^{**}(Bx^{**}c)$; 14. $y=Ax^{**}Be^{**}(cx)$; 15. $y=Ae^{**}(bx)+Ce^{**}(dx)$

Здесь уравнения 4, 6, 13 и 14 описывают центральные кривые (проходящие через начало координат). Среди перечисленных уравнений можно выделить уравнения монотонно изменяющихся функций с двумя (1-7), тремя (8-9) и четырьмя коэффициентами (10). Уравнения 1, 3, 6 и 7 представляют частные случаи дробно-линейного уравнения при обращении в ноль одного из коэффициентов. Уравнениями 11, 14 и 15 описываются кривые с экстремальным перегибом, причем 11-уравнение симметричной кривой относительно вертикальной оси, а 14 и 15 - асимметричных кривых. Уравнения 12 и 13 описывают "S"-образные кривые.

Коэффициенты уравнений 1-11, 14 и 15 определяются методом наименьших квадратов после их линеаризации, проводимой путем подстановки новых переменных, обращающих рассматриваемое уравнение в уравнение прямой. Коэффициенты уравнения 12 и 13 определяются методом последовательного приближения. Частные уравнения $Y=F_i(X_i)$ могут объединяться в общее

различными способами. Простейший из них заключается в том, что общая модель представляется в виде произведения или суммы частных зависимостей [155]. В этих случаях применяют метод последовательной нейтрализации влияния на конечную функцию аргументов. В последнем случае нейтрализация осуществляется комбинированная с использованием на каждом этапе одного из предыдущих вариантов, выбор которого каждый раз осуществляется также по минимальному СКО. В этом случае конечное уравнение может иметь более сложный вид, например:

$Y = [F_1(X_1) \cdot F_2(X_2) + F_3(X_3)] \cdot F_4(X_4)$, но не $y = F_1(X_1) \cdot F_2(X_2) + F_3(X_3)$, умножение очередного частного уравнения должно проводиться на все полученное до этого выражение (4). Программа ANETR предусматривает ряд вариантов работы, что определяет ее достаточно высокую универсальность, в т. ч. возможность учета имеющихся теоретических предпосылок при выборе уравнений парных зависимостей. Варианты программы задаются управляющими параметрами, значение искомой функции в виде нормализованных чисел с плавающей запятой, например, 1.28000E+0(=128), -3.60000E-01(=-0.36). Матрицы планирования, когда m не более, чем $n + 1$, $m=4-5$, $n=4$ при этом m - число аргументов (факторов), n - число уровней каждого аргумента.

В нем прослеживаются последовательность нейтрализации, данные о парных уравнениях (их N , коэффициенты), динамика изменения СКО%, R и СКО ср%. Последний показатель представляет дополнительную оценку надежности парных зависимостей, если она больше 20, зависимость должна быть изучена дополнительно. Под таблицей формуляра приводится значение максимального отклонения расчетного значения функции от замеренного $D_{\max}$ с указанием N замера, СКО% и упомянутая выше информация о критерии Фишера. Значение этого параметра помещается под формуляром модели. По значению СКО% будет выполнена оценка модели. Модель отличная по своему качеству если значение $\text{СКО}\% \leq 20$. Хорошая модель будет при значении СКО% в пределах от 20 до 50. Используя этот критерий можно выполнить расчет критерия Фишера (F). ANETR позволил выполнить оценку точности математических моделей по критерию

Фишера. Этот критерий позволяет выполнить рациональное планирование эксперимента, а также достичь высокой точности оценки результатов эксперимента, чем оптимальный метод обработки [155]. Программа выполняет расчет (F) с установлением значения критической величины для последующей оценки уровня надежности при $F > 0.01$ будет 99%, а для надежности, равной 95%, необходимо достичь значений $F > 0.05$. Значения $F_{0.01}$ и $F_{0.05}$ программа рассчитывает для числа опытов от 4 до 1000 по приближенным уравнениям 3 – 13. ANETR позволил составить матрицу планирования эксперимента, где m будет числом аргументов (количеством факторов), а параметр n будет числом уровня для каждого аргумента [155]. Исследование изменения параметров НДС и дополнительных потерь при механической нагрузке на ВОК (ОВ) связано с разработкой детерминированных моделей, которые выражают физическую сущность явления и содержат описание механизмов протекания известных механических и оптических процессов. Используемый метод обработки данных основан на теории проф. М. М. Протоdjаконова [155]. Используемый метод является детерминированным и позволяет реализовать выбор необходимых моделей с у которых известны данные (тип уравнений, пределы и т. д.) [155]. В диссертационной работе использованы основные теоретические положения физики, раздела оптики и методы передачи данных по ОВ. Для обработки полученных данных от ВОД были использованы методы цифровой обработки оптических и электрических сигналов, а также работы с видеоизображениями. Достоверность и надежность полученных результатов была обеспечена за счёт методов обработки, полученных при проведении компьютерного моделирования и натурных экспериментов. Экспериментальные исследования ВОД были подкреплены значительным объемом проведенных лабораторных опытов и полевых испытаний. Для получения достоверных результатов и калибровки ВОД были проведены опыты с использованием поверенной нагрузочной машины в сертифицированной лаборатории. В проведенных ранее исследованиях, результаты которых опубликованы в [5, 141, 142], была выдвинута идея создать АПКТК, у которого ВОД будет стандартный одномодовый ВОК. Использование

ОВ стандарта G652 в качестве квазираспределённого или распределённого ВОД позволит создать СК для непрерывного контроля технического состояния оптических кабелей. АПКТК и ВОД должны работать в режиме реального времени для контроля изменения НДС ВОК и своевременного оповещения оператора об опасности повреждения ВОК или возникновения ситуации НД. Выдвинутая гипотеза была проверена теоретическим и экспериментальным путем, опираясь на использование законов научной логики и основ проведения эмпирических исследований. Все исследования носят прикладной характер, для достижения поставленной цели было проведено математическое и натурное моделирование, что позволило сделать обоснование параметров и конфигурации интеллектуальной системы контроля технического состояния ВОК. Информация об основе методологии и методики научных исследований, а также об использовании общенаучных методов исследования и обработки экспериментальных данных была получена из [148, 156].

2.2 Метод контроля технического состояния ВОК

Ранее уже было сказано, что внешнее силовое воздействие на ОВ вызывает изменение параметров световой волны [5,141,142]. Оптическое излучение (мода) генерируется источником, которым может быть полупроводниковый лазер с длиной волны от 650-1550 нм, проходит по ОВ и поступает на чувствительную поверхность фотоматрицы высокого разрешения. Мощность источника излучения не превышает 1 Вт. ОВ находится внутри оптического кабеля и является нераздельной частью его конструкции, а также используется как чувствительный элемент. При воздействии на кабель возникает деформация, которая воспринимается одномодовым ОВ. На торце ОВ формируется пятно света (ПС), напоминающее пятно Пуассона, которое лежит на поверхности фотоматрицы высокого разрешения (ФМВР, HD или Full HD), которая воспринимает все изменения интенсивности сформированного ПС аналогичного пятну Пуассона. Изменение интенсивности вызывает механическое воздействие на ОВ, при

увеличении дополнительных потерь интенсивность световой волны снижается. Сформированное ПС, аналогичное пятну Пуассона, подчиняется закону нормального распределения Гаусса. Метод позволяет контролировать уровень ВСВ на оптический кабель и его деформацию через изменения параметров оптической волны, которая проходит по ОВ, а также сформированных показателей дополнительных потерь, и падает на поверхность ФМВР (HD или Full HD), которая преобразовывает оптический сигнал в электрический. Затем происходит трансформация изображения светового пятна в визуальные сигналы с распределением пикселей. При механическом воздействии на ВОК, когда возникают изгиб, растяжение, кручение ОВ, АПКТК анализирует изменение картины распределения пикселей и процесса их трансформации из черного цвета в белый, с последующей выдачей численного значения. Данный метод позволяет контролировать изменения параметров механического воздействия на ВОК при помощи оптико-электронного анализа изменения параметров дополнительных потерь в ОВ, которые влияют на интенсивность светового пятна. АПКТК контролирует величину и частоту воздействия, а также фиксирует число оказанных на ВОК воздействий в течение установленного отрезка времени. Источник излучения и фотоприемник могут быть разнесены и тогда достаточно одного ОВ для контроля деформации (изгиб, растяжение, кручение). Вторым вариантом является, когда источник излучения и фотоприемник находятся на одной стороне, но в таком случае используется два ОВ: одно - для прямого направления луча, второе - для обратного хода луча. ОВ соединяются последовательно при помощи установления соединительной перемычки на противоположной стороне от источника и фотоприемника. Изменение оптических параметров напрямую связано с изменением уровня воздействия на ВОК, соответственно при помощи данного метода можно контролировать техническое состояние оптического кабеля, который используется во внутризоновых системах телекоммуникации. В кабеле имеются резервные волокна, которые не задействованы в процессе передачи информации, формируется определенная выгода данного метода, так как не нужно тратить материальные средства на сам

ВОД. Второй особенностью данного метода является алгоритм обработки данных отличный от уже известных методов оптической интерферометрии и рефлексомерии или ВРБ. На выходе из ОВ устанавливается фотоматрица высокого разрешения вместо однопиксельного фотодиода. Исследования будут проводиться при помощи разработанного АПКТК и ВОД. В качестве ВОД будет использован стандартный одномодовый волоконно-оптический кабель ОВ, который используется во внутризоновых системах телекоммуникации. Кабель изготовлен из ОВ стандарта G 652, с его параметрами и характеристикой можно ознакомиться в [3-5].

Так как ВОД выполнен на базе оптического кабеля, в основе работы ВОД лежит известный фотоупругий эффект, который возникает в ОВ в случае ВСВ на его боковую сторону (включая условный верх и низ). Как сказано ранее, фотоупругий эффект сопровождается изменением параметра преломления ОВ. Механическое воздействие на ОВ вызывает микроизгиб, что приводит к выходу части световой волны (моды) за пределы оболочки. Это явление вызывает дополнительные потери, которые можно зафиксировать. Изгиб, кручение, растяжение ОВ вызывают потери оптической мощности, а также при превышении допустимой нагрузки ОВ может быть повреждено или разрушено. Методика в своей основе имеет изменение параметров преломления при изгибе и микроизгибе, при которых возникают дополнительные потери и часть оптического излучения выходит из сердцевины в оболочку, а также покидает ОВ. Пунктирной линией показана часть излучения, которое выходит из ОВ (Рисунок 4). На входе уровень мощности выше, а на выходе ниже, часть излучения выходит из ОВ. При возникновении микроизгиба ОВ стандарта G652 происходят изменения свойств световой волны [159]. Выбрано одномодовое ОВ стандарта G652, так как данный тип ОВ имеет низкие параметры затухания оптического сигнала. Потеря оптической мощности в пределах 0,22 dB/km для оптической волны 1550 нм, это достаточно высокий показатель передаточной способности, при этом затраты энергии сведены к минимуму, практически меньше 1 Вт. Обоснованием использования ОВ стандарта G652 является в первую очередь

низкая стоимость и массовостью его применения в системах телекоммуникаций в населенных пунктах и на предприятиях.

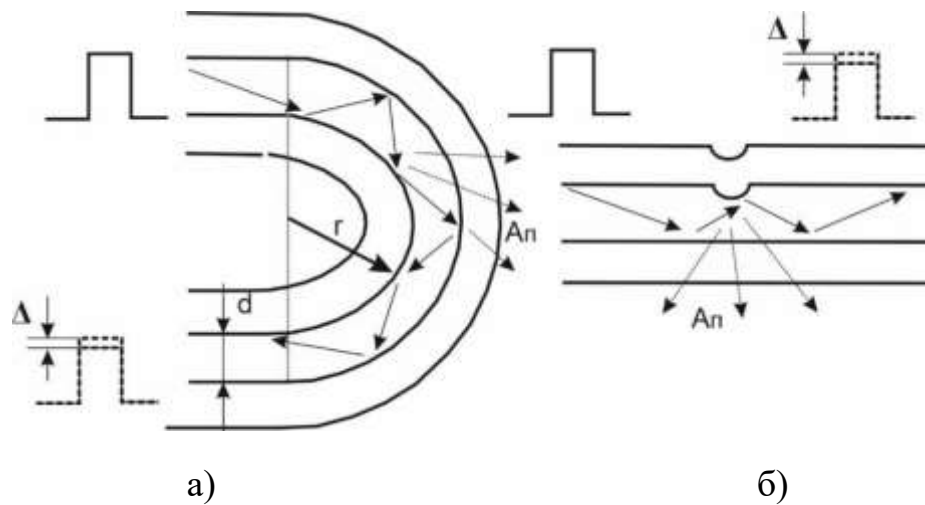


Рисунок 4 - Случаи изгиба ОВ

а) изгиб ОВ; б) микроизгиб ОВ

Во-вторых, оно уже имеется в ВОК. Подавляющая часть ВОК для внутризоновых сетей основана на использовании стандарта G652, но для магистральных ВОК используются ОВ более высоких стандартов. Предлагаемый АПКТК способен работать с ВОД, основанным на ОВ стандарта G652 и выше и предназначен для эксплуатации внутризоновых сетей телекоммуникации населенных пунктов и промышленных предприятий. Использовано многомодовое ОВ стандарта G651 для создания ВОД, но в этом случае появляется ограниченность в дистанции, которая обычно не превышает 500 метров [141, 142], в других источниках отмечено, что это расстояние может быть больше - примерно до 900 метров. Вторым обстоятельством, мешающим использовать ОВ стандарта G651: данное волокно не входит в состав стандартных телекоммуникационных ВОК, а размещать ВОД отдельно от ВОК не целесообразно и будет определенной технической проблемой. ВОК, основанные на ОВ стандарта G651, в настоящий момент используются только в локальных сетях для коммутации вычислительной техники или серверов, также их можно применять для коммутации устройств автоматики. Преимуществом ОВ стандарта G651 является меньшее влияние шума на работу измерительного канала, так как

сердцевина имеет больший диаметр в 50 мкм в отличие от одномодового ОВ, у которого диаметр составляет 9 мкм [141,142]. Многомодовое ОВ стандарта G651 исключено из рассмотрения, а также более высокие стандарты - G653 и выше. Информацию о дополнительных потерях ОВ при микроизгибе можно найти в ранних статьях, посвященных исследованию ОВ [159,160].

Для обоснования методики контроля необходимо выбрать схему СК, а также обсудить техническое содержание и принцип работы различных вариантов. Данные схемы уже были рассмотрены ранее в статье, посвящённой разработке СК [161], но выполнена их модернизация и сделаны дополнения с учетом развития СК. Наиболее простой по конструкции и содержанию может быть схема СК №1, представленная на рисунке 5.

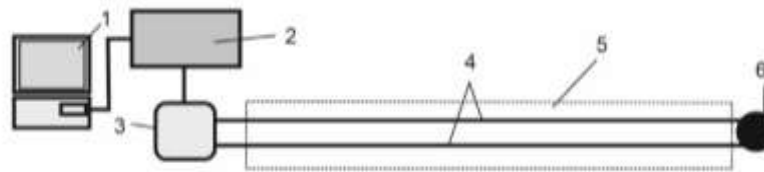


Рисунок 5 – Схема СК №1

1 – персональный компьютер с ПО и монитором для отображения информации; 2 – блок для обработки данных; 3 – источник излучения (модуль ввода); 4 – чувствительный элемент (ВОК или ОВ); 5 – объект контроля (периметр, кабель или иной объект); 6 – фотоприемник (модуль вывода)

В данной схеме применяется известный метод корреляционной обработки оптических сигналов, которые проходят по двум ВОК или можно использовать два ОВ, которые находятся в одном модуле стандартного оптического кабеля, это большой плюс данной схемы. Данная схема теоретически могла быть использована как основа АПКТК, но у нее есть некоторые недостатки, которые послужили поводом для исключения данной схемы от дальнейшей разработки и применения. Это обычный волоконно-оптический интерферометр с присущими ему недостатками. Световая волна проходит через два ОВ или ВОК, в конце устанавливается модуль вывода или, можно сказать, фотоприемник, который

находится на противоположном конце ВОК и ОВ, что крайне неудобно с технической точки зрения. В модуле вывода (фотоприемник) происходит интерференция обоих лучей, соответственно основой данной конструкции является оптический интерферометр, а его недостатки известны. СК реагирует на принцип фиксации микронапряжений при микроизгибе, когда происходит механическое воздействие на ВОК или ОВ. При этом происходит изменение картины интерференции волн и наблюдается изменение хода лучей. Изменение интерференционной картины позволяет установить вторжение. Фотоприемник фиксирует изменения интенсивности, данные обрабатываются микропроцессором и выводятся на устройство отображения информации. Проблема заключается в сложности точного установления расстояния до точки силового воздействия и вероятности ложного, а также и неточного отображения точки воздействия на всей дистанции ВОК (ОВ). В основном данная схема пригодна для фиксации вторжения на всем участке ВОК или информирования о его повреждении без указания конкретного расстояния. Анализ показал, что данная схема не пригодна для построения АПКТК [161].

Более эффективная по определению места вторжения или повреждения ВОК (ОВ), но более сложная как в настройке, так и в эксплуатации, это схема №2 (рисунок 6). Схема СК №2 отличается от схемы №1 наличием дополнительного или выходного ВОК (ОВ), по которому световая волна возвращается к модулю ввода или блоку, где может находиться фотоприемник. В данной схеме используется третье (выходное) ОВ, которое служит для передачи оптического сигнала от выводного модуля к фотоприемнику. В данной схеме модуль вывода не содержит фотоприемника, что делает схему №2 более удобной в эксплуатации. Это обычный волоконно-оптический интерферометр Маха-Цандера с присущими ему недостатками, поэтому принцип работы схемы №2 аналогичен схеме №1. Также имеется два плеча интерферометра, если нет воздействия на ВОК (ОВ), то интерференционная картинка будет неизменной, если будет оказано механическое воздействие, тогда интерференционная картинка изменится, будет

наблюдаться ход лучей и фотоприемник зафиксирует изменение интенсивности световой волны [161].

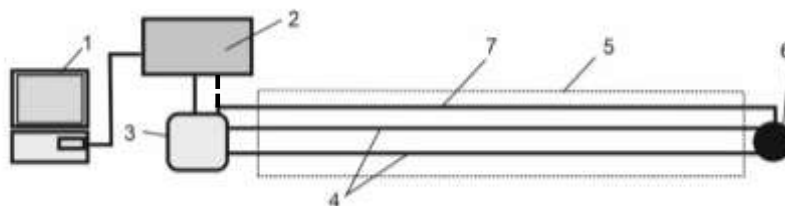


Рисунок 6 – Схема К №2

1 – персональный компьютер с программным обеспечением (устройство отображения информации); 2 – блок обработки данных; 3 – источник излучения (модуль ввода); 4 – чувствительный элемент (ВОК или ОВ); 5 – объект контроля (периметр или иной объект); 6 – модуль вывода; 7 – дополнительный ВОК (ОВ) или выходной ВОК (ОВ).

Так как данная схема пригодна для фиксации вторжения на всем участке ВОК или информирования о его повреждении, без указания конкретного расстояния, то она тоже исключается из разработки.

Еще более эффективная по определению места вторжения или повреждения ВОК (ОВ), но уже более сложная и дорогостоящая, это схема №3 (рисунок 7). Несмотря на то, что схема содержит меньше элементов, надёжность работы не увеличивается, но ее несомненным преимуществом является использование только одного ВОК (ОВ) для организации одного распределенного ВОД [161]. Эта схема уже больше удовлетворяет задачам данной диссертационной работы, но на один канал нужен один оптический рефлектометр. Телекоммуникационная сеть населенных пунктов и промышленных предприятий является разветвленной и содержит множество присоединений. Данная схема пригодна для магистральных кабелей, где она и используется в настоящее время, соответственно количество рефлектометров будет зависеть от числа каналов.

В данной схеме используется оптический рефлектометр, способный контролировать уровень рассеяния Бриллюэна или Рэлея, это относится к

методам когерентной оптической рефлектометрии с временным или частотным разрешением [161].

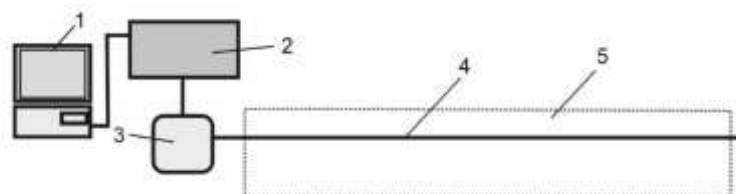


Рисунок 7 – Схема СК №3

1 – персональный компьютер с программным обеспечением (устройство отображения информации); 2 – блок обработки данных; 3 – оптический рефлектометр; 4 – чувствительный элемент (ВОК или ОВ); 5 – объект контроля (периметр или иной объект).

При механическом воздействии на ВОК (ОВ) изменяются коэффициент преломления и другие параметры, возникшие неоднородности или уже сформированные вызывают эффект рассеяния [5, 161,162], часть оптического излучения, а это достаточно малая величина (одна сотысячная или одна миллионная доля), отражается от различного рода неоднородностей обратно и фиксируется фотоприемником. Далее блок обработки данных и персональный компьютер обрабатывают информацию и выдают результат [162]. Для повышения надежности работы схемы №3 необходимо иметь второй независимый канал, а это уже отдельный оптический рефлектометр, что существенно повышает стоимость СК. Необходима корреляционная обработка сигналов от двух ВОК (ОВ) или ВОД, это позволит отфильтровать различные помехи (шум дождя, транспорта и т.п.) и выделить из фона полезный сигналы. Если не будет резервных каналов, то при повреждении одного единственного ВОД (ВОК или ОВ) система выводится из работы. Такая система пригодна для охраны периметра или контроля технического состояния протяженных объектов. В обращении прибор требует определенных навыков при работе с ним. Также нужно учесть, что обычный оптический рефлектометр, используемый для измерения оптических потерь и повреждения ВОК (ОВ), который используется для ручного измерения в системах телекоммуникации, не пригоден для

использования по ряду причин. Например, нужен вариант с функцией непрерывной работы, передачи данных по сети, должна быть возможность дистанционной сетевой настройки и управления и многое другое. Соответственно этот прибор будет иметь стоимость в несколько раз выше, чем стандартный вариант общепромышленного производства. Его стоимость резко возрастает при переходе на многоканальный вариант, который крайне необходим для обеспечения резервирования измерительных каналов. Можно отметить, что способность оптического рефлектометра работать в круглосуточном автоматическом режиме и передавать данные по сети является достаточно дорогостоящей опцией. Большой проблемой для его работы будут различного рода ответвления и закольцовки, поэтому сфера применения данной схемы больше относится к магистральным линиям ВОЛП. Имеются системы мониторинга технического состояния ВОЛП, которые подключаются в ВОК и используют рабочее или резервное ОВ, которое имеется в магистральном ВОК. Используется длина волны 900-1550 нм для тестирования и мониторинга резервных волокон и 1625 нм для рабочих волокон. Данная схема позволяет с достаточно высокой точностью определить место вторжения, НД или повреждения ВОК. Разрешающая способность зависит от типа оптического рефлектометра и его стоимости, на основании расчета время задержки отраженного сигнала. Разрешающая способность данной схемы может лежать в пределах от 1 до 10 метров. В итоге данная схема не может быть использована для решения задач диссертационной работы, но частично рассмотренные методы будут применены.

Наиболее новым вариантом схемы с принципиальными отличиями от рассмотренных выше схем является схема №4, представленная на рисунке 8. Данная схема уже была рассмотрена сторонними авторами [163,164]. Также в более поздних работах автора ВРБ тоже рассматривались, а также обсуждалась перспектива их применения именно для охраны от кражи и НД [165,166]. Автор рассмотрел ранее, где можно эффективно использовать ВРБ [162], такое же мнение имеют другие авторы [94,95,140]. В данных статьях представлены

преимущества применения ВРБ при разработке ВОСО для охраны периметров и в угольной промышленности для контроля давления и температуры горных пород. При кажущейся простоте реализовать данную схему достаточно сложно, так как понадобятся ВРБ и анализатор оптического спектра, а это уже достаточно дорогие компоненты. В данной работе найден свой метод, отличный от рассмотренных ранее и представленных на схемах №1-4, причины поиска своего решения обосновываются автором в статьях [140,143].

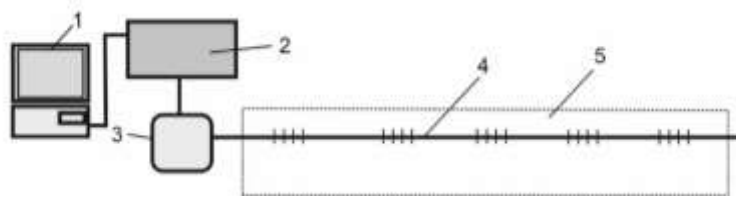


Рисунок 8 – Схема СК №4

1 – персональный компьютер с программным обеспечением (устройство отображения информации); 2 – блок обработки данных; 3 – оптический анализатор спектра; 4 – чувствительный элемент (ВОК или ОВ); 5 – объект контроля (периметр или иной объект).

О причинах отказа от схемы №4, основанной на использовании ВРБ и оптического анализатора спектра, для контроля технического состояния ВОК уже сказано ранее.

Использование ВРБ является не совсем оправданным вариантом для построения собственной схемы, так как это уже не имеет научной новизны по ожидаемому результату, а также является достаточно изученным направлением науки и техники. Направление использования ВРБ было изучено и проанализировано. При всех достоинствах данная схема имеет ряд существенных недостатков и непреодолимых для ее применения в системах телекоммуникации. Во-первых, для реализации понадобится вырастить решетки Брэгга и затем их встроить в оптический кабель. Если быть точными приварить участки ОВ к общему ОВ самого ВОК. Соответственно придется вскрывать оболочку кабеля через определенные промежутки и чем чаще делать вставки, тем лучше.

Получится ВОД квази-распределённого типа, как это можно сказать о первых двух схемах, соответственно точность определена, и разрешающая способность АПКТК будет зависеть от количества участков. ВОК со встроенными ВОД на основе ВРБ не выпускаются, мало того, если специально производить такие кабели, то они будут достаточно дорогие и невостребованные у операторов телекоммуникации. Если закреплять ВОД на основе ВРБ поверх его оболочки (на боковых гранях), то это еще более худший вариант, чем первый по затратам средств и времени рабочих. Мало того, понадобится отдельная защита для ВОД, что сильно увеличит стоимость СК и сделает все мероприятия некупаемыми. Схема №4 имеет немного общего со схемой №3, так как можно использовать одно ОВ для построения ВОД, но это и минус данной схемы, так как при обрыве ВОД система перестает работать, тогда нужны резервные ВОД для перехода на резервные каналы. Вместо оптического рефлектометра можно использовать еще более дорогостоящий и сложный в эксплуатации прибор, которым является оптический анализатор спектра (Рисунок 9).

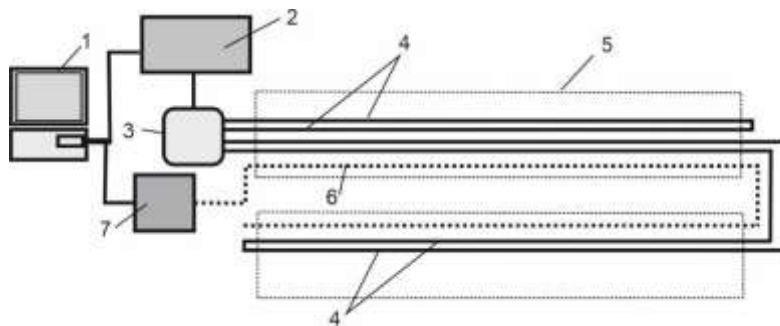


Рисунок 9 – Схема СК №5

1 – персональный компьютер с программным обеспечением (устройство отображения информации); 2 – блок обработки данных; 3 – источник излучения (модуль ввода); 4 – чувствительный элемент (ВОК или ОВ); 5 – объект контроля (периметр или иной объект); 6 – распределённый дополнительный ВОД; 7 – оптический рефлектометр.

Эти обстоятельства делают не приемлемым применение схемы №4 в данной диссертационной работе, так как нужно обеспечить максимально низкую

стоимость капитальных вложений и использование уже существующих ВОК в качестве ВОД.

Вести работы по замене действующих ВОК для организации СК внутризоновых сетей телекоммуникации ни одна компания делать не будет, так как это сопряжено с высокими уровнем затрат и малой эффективностью работы СК. Учитывая все обстоятельства, использование схемы №4 является нецелесообразным.

Учитывая вышесказанное, было принято решение разработать свою схему, которая будет использована в дальнейших лабораторных опытах и практических испытаниях. Схема №5 имеет ряд существенных отличий от своих аналогов, приведенных выше. Важным моментом является то, что данная схема содержит как распределенный, так и квази-распределенный ВОД. В качестве ВОД используется чувствительный элемент на ОВ, которые находятся в оптических модулях самого ВОК.

Каждый ВОД имеет перемычку в конце контрольного участка. По одному ОВ световая волна проходит в прямом направлении, по-другому в обратном, поэтому источник излучения и фотоприемник располагаются с одной стороны, что весьма удобно при эксплуатации СК в реальных телекоммуникационных системах. Оптический рефлектометр может использоваться в ручном режиме при необходимости установить более точное место повреждения ВОК или находиться в стационарном положении и работать в автоматическом режиме. Рекомендуется более упрощенный вариант оптического рефлектометра без экрана с ограниченным количеством опций для снижения стоимости АПКТК. Один рефлектометр можно использовать для определения точного места НД или повреждения ВОК сразу для нескольких направлений ВОЛП. Общая характеристика оптического волокна, использованного для создания ВОД, и конструкция ВОК, представлены в Приложении Б.

2.3 Разработка физико-математической модели оптико-механических процессов, происходящих при деформации оптического волокна находящегося внутри оптического кабеля

Физико-математическая модель оптических процессов, протекающих в ОВ, имеет теоретическую основу нелинейных свойств. Были рассмотрены процессы, связанные с распространением световой волны по сердцевине ОВ с учетом всех деформаций ОВ в широком диапазоне параметров волн (интенсивность, частота волны и др.) и температур [165, 168]. Основой являются известные законы геометрической и волновой оптики, раздела физики, а также феноменологической теории оптико-электрических процессов, связанных со взаимодействием световой волны с ОВ. Представленные далее теоретические суждения имеют ограничения в рамках законов электродинамики сплошной среды и классической волновой теории света, а также на основе ранее опубликованных результатов собственных исследований [107, 165, 168]. Также при подготовке данного раздела были использованы теоретические сведения из источников [5, 131-135, 167].

Световое пятно можно отнести к известному пятну Пуассона [128-138]. При ВСВ на ОВ параметры пятна изменяются и в первую очередь меняется интенсивность [107, 165, 168].

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

Расчетная величина $n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)$. ζ_0 является параметром, представляющим множество различных характеристических молекулярных параметров активации релаксаторов на ионно-молекулярных химических связях; частоты собственных колебаний ионов вблизи положения равновесия (локализованных в узлах кристаллической решетки); ширина потенциального барьера для ионов и др.) и параметров структуры (зависящих от физико-химических свойств и типа и геометрии кристаллической структуры оптоволоконного образца [107, 168, 135-138]. Отклонение параметров лазера Δ .

Показатель преломления вещества ОВ представлен как [107, 168]

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

Используются методы кинетической теории и электродинамики сплошной среды, которые дают закономерности релаксационных процессов, связанных с взаимодействием электрического и магнитного полей световой волны со структурными элементами кристаллической решетки. На показатель преломления влияют геометрические характеристики кристаллической структуры ОВ и оптико-геометрические параметры, которыми являются угол падения луча на поверхность материала θ и угол α_0 между волновым вектором, преломленным в ОВ, и вектором нормали к поверхности фотоприемника. На показатель преломления вещества ОВ оказывают влияние внешние полевые воздействия, например, частота ω и амплитуда A волны и интенсивность световой волны [107,168].

Произведем усреднение по углам α_0 функции (1)

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

Используем нулевое приближение теории возмущений по безразмерным малым параметрам деформаций $\frac{\delta d}{d}$, $\frac{\delta(\vec{\tau}_0 \vec{r})}{(\vec{\tau}_0 \vec{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$ в выражении (2), которое можно использовать для расчета значения объемной плотности мощности электромагнитного поля оптической волны, которая падает на поверхность фотоприемника и анализируется. Рассмотрим влияние условий распространения оптического сигнала на его мощность. Распределение интенсивности световой волны по углам α между вектором нормали к поверхности фотоприемника. Фотоприемник можно представить как круглый светочувствительный элемент или мембрану с радиусом R , которая 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 $I_0(r)$. Согласно закону экспоненциального распределения интенсивность электромагнитной волны по радиальной компоненте выражается [107,168]

$$I_{00}(r) = I_0(0) \times \frac{1}{Ar_1}.$$

В итоге получаем уравнение

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

$$I_0(0) = I_{\text{exp}} = \frac{W}{S},$$

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 [107,168].

$$\langle P_{Vt}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c \pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (4)$$

Рассмотрим частный случай, когда ОВ находится в ВОК с уточненными нагрузками, при этом воздействие осуществлялось в центре ВОК. Выполним математическое моделирование процесса неупругой деформации в ВОК с учетом закона Гука, точность расчета до члена четвертой степени. Произведем разложение потенциальной энергии напряженно-деформированного тела ВОК по смещениям

$$U(x) \approx \frac{kx^2}{2} + \frac{\beta x^4}{4}. \quad (5)$$

В выражении (9) использованы уже известные основы теории упругости, а именно коэффициенты

$$\beta = \frac{k\beta_V}{l^2}, \quad k = \frac{ES}{l}, \quad \beta = \frac{ES\beta_V}{l^3} = \frac{k\beta_V}{l^2},$$

где E – модуль Юнга материала ВОК.

Коэффициент относительного объемного расширения равен $\beta_V = \mu \varepsilon_{\parallel}^2$,

где $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta l}{l}$ – относительное продольное удлинение (или сжатие),

$\mu = \frac{\beta_V}{\varepsilon_{\parallel}^2}$ – коэффициент Пуассона, рассчитываемый с учетом параметра $\beta_V = \frac{\Delta V}{V}$.

Получим абсолютное продольное удлинение (или сжатие)

$$\Delta l = \frac{2mg}{k} = \frac{2mgl}{ES}, \quad (6)$$

где $S = \pi r_1^2$ – площадь поперечного сечения недеформированного ВОК массой m .

$$\mu = ES \frac{\left| \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg} = \frac{E\pi r_1^2 \left| \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg}. \quad (7)$$

Коэффициент Пуассона (11) может быть различным

для случаев продольного расширения $r_2 > r_1$,

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}} \quad (8)$$

или сжатия $r_2 < r_1$, когда

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi r_1^2}}. \quad (9)$$

Окончательным выражением для абсолютного и относительного поперечного удлинения будет следующая обобщенная формула [107,168]

$$r_2 - r_1 = r_1 \left(\sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E\pi_1^2}} - 1 \right), \quad \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E\pi_1^2}} - 1, \quad (10)$$

$$r_2 - r_1 = r_1 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi_1^2}} \right), \quad \frac{r_2 - r_1}{r_1} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E\pi_1^2}}. \quad (11)$$

Распределение объемной плотности мощности электромагнитного поля волны в ОВ, при условии, что в расположенном вдоль оси горизонтальной деформируемой ВОК имеется угол α_0 , который формируется при падения 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. Окончательные выражения для контроля параметров оптической волны, проходящей по ОВ, которое помещено в тело ВОК с уточненными нагрузками, можно представить двумя выражениями.

При отсутствии деформации ВОК и ОВ [107,168]

$$P_{vt}(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) d\alpha_0 \Delta. \quad (12)$$

При деформации ВОК и ОВ

$$P_{vt}(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) d\alpha_0 \Delta \quad (13)$$

Представленные математические выражения дают полное описание всех процессов, связанных с деформацией ОВ и изменением свойств оптической волны, проходящей по его сердцевине, которые можно зафиксировать и преобразовать в численные значения измеряемой величины.

Влияние оптических шумов на оптоэлектронные процессы в оптоволоконных проводящих линиях. Электрофизические и оптоэлектронные процессы,

протекающие в оптоволоконных линиях передач (ОВЛП) , связаны со взаимодействием электромагнитного поля волны (светового потока) с веществом оптоволоконного элемента, являющихся основным рабочим органом системы, и с процессами такого же рода в дополнительных элементах ОВЛП: источник излучения (лазер, мазер, импульсный источник или СВЧ – генератор и т.д.); усилитель сигнала (на основе системы определенным образом распределенных полупроводящих элементов (на основе системы Zr, Er, Se, Y, Al, Ge, Si и др.); световые оптические циркуляторы, зеркала Фарадея и т.д.; интегральные фазовые модуляторы (ИМФ) и др.

На рисунке 1В, Приложение В, показана условная схема установки для измерения оптических шумов в ОВЛП. Наиболее наглядным интерпретатором влияния побочных электрооптических явлений на ОВЛП и ее элементы является график зависимостей напряжений от данных воздействий в виде мощности выходного электрического сигнала, отражающего мощность светового потока, взаимодействующего с фотоприемником (фотопластинки). Одним из наиболее эффективных проявлений побочных электронно-оптических эффектов в ОВЛП являются оптические шумы, возникающие под действием источника светового излучения (лазера) из-за спонтанных переходов фотонов, нарушающего когерентность электронного потока. Кроме оптических шумов различают шумы в усилителях, фотоприемнике (дробовой и тепловой шум) и в оптическом циркуляторе.

Численной мерой оптического шума является относительная плотность шума, определяемая как отношение мощности электромагнитной волны (потока), снимаемой с фотоприемника, к мощности оптического шума в ОВ [107,168]:

$$R = \frac{C}{N} , \quad (14)$$

где R (от термина «relative intensity noise») – есть отношение мощности основного оптического потока (carried) P_0 и шумового (noise) P_n . Тогда

$$C = \frac{P_n}{P_0} . \quad (15)$$

Измеряемая в эксперименте величина объемной плотности мощности оптического сигнала, поступающего на фотоприемник (основной оптический сигнал) P_{eV} , вычисляется согласно базовым уравнениям $P_{eV} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0^2$, где E_0 – амплитуда электрического поля волны, $\left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right]$.

Из условия $\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0^2 = \mu_0 \mu_\infty H_0^2$, согласно $S = I = \frac{1}{2} E_0 H_0$, в силу $E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\infty}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}} H_0$, $H_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{\mu_0 \mu_\infty}} E_0$, принимая $I = \frac{1}{2} E_0^2 \times \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_\infty}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}}$, имеем $P_{Ve} = 2\omega \times \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_\infty \mu_\infty \times I = 2 \frac{\omega}{c} I \times n_\infty$, после усреднения по параметру имеем

$$\langle P_{eV} \rangle = \frac{\omega}{c\pi} \int_0^{2\pi} I(\alpha) \cdot n_\infty(\xi_0, T, \omega, E_0, \eta) d\alpha, \quad (16)$$

параметр η в выражении (16) на математическом уровне отражает вклад оптического шума в величину $\langle P_{eV} \rangle$, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}, \frac{J}{\text{м}^3}\right]$.

Измеряемая для идеального случая (без оптического шума) величина

$$\langle P_{eV,0} \rangle = \frac{\omega c}{\pi} \int_0^{2\pi} I(\alpha) \cdot n_\infty(\xi_0, T, \omega, E_0, T, \alpha) d\alpha. \quad (17)$$

С учетом оптического шума

$$\langle P_{eV,n} \rangle = \frac{c}{\pi} \sum_{k=1}^m \omega_k \int_0^{2\pi} I_k(\alpha) \cdot n_{\infty_k}(\xi_0, \omega_k, E_{0_k}, d, \eta_k) d\alpha. \quad (18)$$

В (18) параметры $\omega_k, E_{0_k}, \eta_k$ описывают вклад частоты k -й компоненты оптического шума, ее амплитуда, сигнал E_{0_k} и вклад k -й компоненты шума на показатель преломления оптоволокна η_k .

Исследуем результирующий электромагнитный сигнал в ОВЛП, с учетом оптического шума в ОВ, с помощью уравнений волны.

Уравнение электромагнитной волны в веществе

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - k\gamma)}. \quad (19)$$

В (6), $\vec{k} = \frac{\omega}{g} \vec{n} = \frac{\omega}{c} n_\infty \cdot \vec{n}$, где $\vec{n}$ – вектор нормали к поверхности фронте волны ($\vec{n} \parallel \vec{k}$).

$\vec{r} = r - \vec{j}$, где $\vec{j}$ – касательный вектор ($J=1$) к линиям потенциала ($\vec{r} \parallel \vec{j}$).

Тогда, для k -й компоненты оптического шума

$$\vec{E}_k = \vec{E}_{0_k} e^{i(\omega_k t - \varphi_k)}, \quad (20)$$

где φ_k – пространственная фаза электромагнитной волны применяемая как $\varphi_k = \text{const}$.

Далее суммируя k – й компоненты электромагнитного фона получаем следующее выражение

$$\vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{E}_k = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cdot e^{i(\omega_k t - \varphi_k)},$$

Соответственно

$$\vec{E} = \text{Re} \vec{E} + i I_m \vec{E}. \quad (21)$$

Здесь

$$\text{Re} \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos(\omega_k t - \varphi_k),$$

$$I_m \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \sin(\omega_k t - \varphi_k).$$

Далее, из выражения

$$\cos(\omega_k t - \varphi_k) = \cos(\omega_k t) \cos \varphi_k + \sin(\omega_k t) \sin \varphi_k$$

имеем

$$\sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos(\omega_k t - \varphi_k) = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos \varphi_k \cdot \cos(\omega_k t) + \vec{E}_{0_k} \sin \varphi_k \cdot \sin(\omega_k t)$$

а

$$\sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \sin(\omega_k t - \varphi_k) = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos \varphi_k \sin(\omega_k t) - \vec{E}_{0_k} \sin \varphi_k \cdot \cos(\omega_k t).$$

Далее

$$\text{Re} \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos \varphi_k \cdot \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \sin \varphi_k \cdot \sin(\omega_k t), \quad (22.1)$$

$$I_m \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \cos \varphi_k \cdot \sin(\omega_k t) - \sum_{k=1}^m \vec{E}_{0_k} \sin \varphi_k \cdot \cos(\omega_k t), \quad (22.2)$$

$$\text{Re} \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{A}_k \cos(\omega_k t) + \vec{B}_k \sin(\omega_k t)$$

$$I_m \vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{A}_k \sin(\omega_k t) - \vec{B}_k \cos(\omega_k t).$$

Тогда

$$\vec{E} = \sum_{k=1}^m \vec{A}_k e^{i\omega_k t} + \vec{B}_k e^{-i\omega_k t}$$

$$\vec{E} = \sum_{k=1}^m [\vec{C}_k \cos(\omega_k t) + \vec{D}_k \sin(\omega_k t)] . \quad (23)$$

Мощность выходного оптического шума

$$P_{eV,k} = \omega_k \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty,k} E_{0k}^2 . \quad (24)$$

В сумме

$$P_{eV} = \varepsilon_0 \sum_k \omega_k \varepsilon_{\infty,k} E_{0k}^2 . \quad (25)$$

В общем

$$P_{eV}(t) = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} \overrightarrow{E_0^2} . \quad (26)$$

Удобно перейти к эффективной частоте

$$P_{eV}(t) = \omega_{eff} \varepsilon_{\infty,eff} \overrightarrow{E_{eff,0}^2} \quad (27)$$

В отсутствие оптических шумов

$$P_{eV,0}(t) = \omega \varepsilon_{\infty} \overrightarrow{E_0^2} . \quad (28)$$

Соответственно, выражение

$$\frac{P_{eV,0}}{P_{eV}} = \frac{\omega_{eff} \varepsilon_{\infty,eff} E_{eff,0}^2}{\omega \varepsilon_{\infty} E_0^2} \quad (29)$$

рассчитывает влияние некогерентностей входного лазерного излучения (светового потока) на величину выходной мощности оптического сигнала преобразуемого на фотоприемник в регистрируемых электрических системах (Рисунок 10).

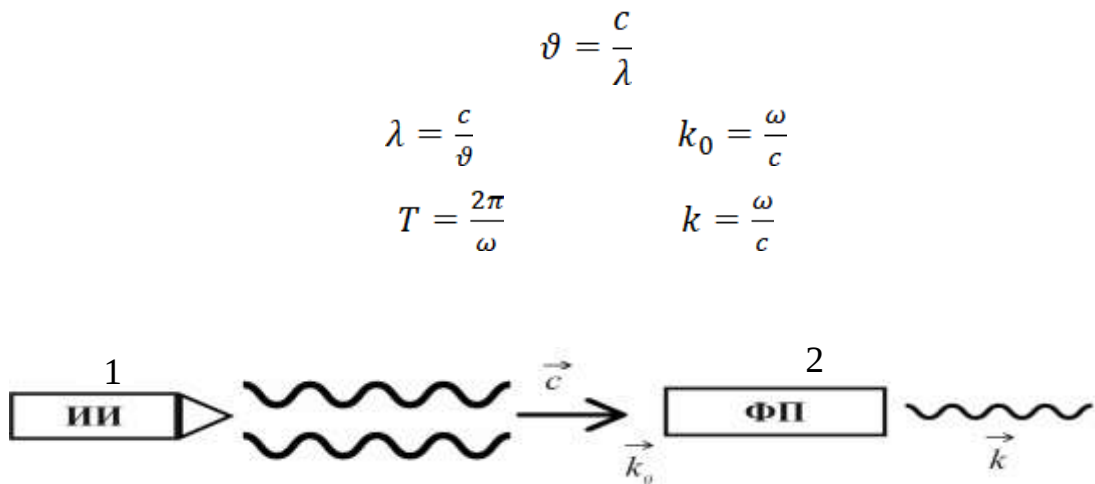


Рисунок 10 - Расчетная схема

1 – источник лазерного излучения (ИИ); 2– фотоприемник (ФП).

В Приложении В рассмотрено дифференциальное уравнение для расчета распределения интенсивности (плотности оптического сигнала) по радиальной компоненте (толщине) слоя оптоволокна.

2.4 Компьютерное моделирование механических нагрузок на оптическое волокно при его растяжении и микроизгибе

Данный раздел начинается с исторической справки, которая необходима для общего понимания основных свойств ОВ. Уже в конце 70-х годов прошлого века инженеры из «Bell-Labs» и «Corning» предложили технологию модификации осаждения MCVD, PCVD, OVD и другие методы и технологии формирования сердцевины и оболочки разной плотности, а также составы специальных примесей [170, 171], что позволило снизить потери до 0,2 дБ/км и менее для длины волны 1550 нм. Позже в 2002 году удалось довести значение потерь до 0,148 дБ/км [170]. Эти события стали началом развития промышленного использования волоконно-оптической техники и перехода систем телекоммуникации на ОВ [170]. Был предложен общий стандарт для ОВ, и его диаметр оболочки установили равным 125 ± 1 мкм, сердцевина для одномодового ОВ принята диаметром 9 ± 1 мкм, а для многомодового 50 ± 1 и $62,5 \pm 1$ мкм. ОВ изготавливается из ультрачистого кремниевого диоксида (SiO_2), для снижения показателей преломления стекло легируется фтором. ОВ сверху покрывается защитным слоем акрилата, которое состоит из двух слоев, один слой более мягкий внутренний и более жесткий внешний. Покрытие из акрилата увеличивает прочность волокна и защищает его от влаги, а также работает против микроизгибов и трещин. Трещины в ОВ создают множество проблем и снижают срок его службы, а также увеличивают потери и приводят к его разрыву. После покрытия диаметр ОВ составляет 245 ± 10 мкм (до 248 мкм). Современные ОВ имеют низкие показатели затухания, ниже 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм. Используются разные показатели: показатель преломления оболочки равен 1,474, а показатель сердцевины — 1,479, в работе ОВ используется эффект полного

внутреннего отражения. Оптическая волна проходит только по сердцевине ОВ, и если ее правильно направить и учесть апертуру входа луча, то волна будет распространяться по сердцевине в теории бесконечно долго, а на практике ограничена дистанцией в 40 - 150 км в зависимости от типа ОВ. Используется эффект бесконечного отражения от оболочки ОВ. ОВ стандарта ITU-T G.652 (полное обозначение international Telecommunication Union — Telecommunication sector) используется массово в большей части ВОК внутризоновой, местной и внутриобъектной системе телекоммуникации. Поэтому выбрано в качестве материала для изготовления ВОД. Стандарт ITU-T G.653, ОВ типа DSF имеет ряд примесей для формирования нулевой дисперсии, которая смещается в третье окно прозрачности, для достижения минимального затухания оптического сигнала. Дисперсия учитывается на магистральных ВОК и обостряется на протяженности около 100 км и более, а для ВОК внутризоновой, местной и внутриобъектной системе телекоммуникации, это проблема является не значительной. Можно еще рассмотреть одномодовое ОВ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF, NZDS), стандарта ITU-T G.655, но оно уже используется для магистральных линий и в данной работе не рассматривается.

Так как в данной работе уделено внимание различным видам деформации ОВ, которое находится внутри ВОК, то вначале можно рассмотреть растяжение ОВ. Деформация ОВ, связанная с его растяжением, довольно часто встречается при эксплуатации ВОК, это приводит к сокращению срока службы ОВ или его повреждению. Предлагаемый ВОД выполнен на базе ОВ, которое находится внутри ВОК, соответственно сроки службы ВОД и ВОК связаны между собой, при повреждении ВОК и ВОД тоже будет поврежден или при воздействии на ВОК будет оказано воздействие и на ВОД. ОВ обладает достаточно высокой прочностью, если взять стальную нить диаметром 125 мкм, то волокно окажется прочнее при испытаниях на разрыве.

Благодаря этому ОВ используется для производства строительной арматуры. При наличии трещин внутри ОВ его прочность снижается в 2-3 раза. Также важным вопросом является защита ОВ от воздействия влаги или различных веществ,

вызывающих его загрязнение, для его защиты используется специальное защитное покрытие из акрила и лака. С покрытием ОВ имеет диаметр до 245 -248 мкм, оно защищает ОВ в первую очередь от формирования микротрещин или позволяет их склеить, если они уже сформировались при изготовлении ОВ. Покрытия могут иметь различный состав в зависимости от сферы использования ОВ, например, легироваться металлами [173, 174]. При анализе литературы установлено, что сейчас ведутся работы, связанные с разработкой покрытий, которые способны повышать прочность ОВ, так как необходимо, чтобы минимальный срок службы ВОК и ВОД соответственно, был бы не менее 25 лет, а при возможности в пределах 50 лет [175,176]. В источнике [172] можно ознакомиться с некоторыми технологиями производства ОВ. Как сказано ранее, показатель преломления $n_1 < n_2$ закладывается при производстве и остаётся неизменным в течение всего срока эксплуатации ОВ. Есть некоторые обстоятельства, которые могут повлиять на показатель преломления: это механическое воздействие на ОВ, влага и температура [160]. Статья [169] является основой данного раздела, ранее автором были проведены исследования влияния механических нагрузок при растяжении ОВ на срок его службы. ОВ имеет различные характеристики, но в данном разделе учитывается механическая прочность. ОВ является твердым телом и подвергается деформации, у него есть предел прочности, когда достигается максимальное значение допустимых механических напряжений, что приводит к физическому разрушению ОВ. Были проведены практические опыты по растяжению и разрыву ОВ без его изгиба. Далее полученные данные позволили создать адекватную компьютерную модель ОВ стандарта G 652 с размерами 125 / 9 мкм (диаметр оболочки / диаметр сердцевины). Учитывая рекомендации [146-149], эксперименты были спланированы, а полученные данные прошли статистическую обработку. При проведении экспериментов было испытано 50 образцов (отрезков) ОВ. Использованы отрезки ОВ длиной 1 м, скорость удлинения составила 20 мм/мин, было зафиксировано удлинение ОВ на 7 % (72 мм). Время испытаний каждого отрезка ОВ составило 2 мин. Результаты опытов показали, что ОВ при

нагрузении от 54 до 58Н подвергалось разрушению при удлинении более 7%. При этом некоторые производители и теоретики утверждают, что прочность ОВ более высокая, предел составляет 180Н при относительном удлинении до 26 %. Сформировалось некоторое несоответствие и противоречие, но, изучив основы теории Гриффитса, появилось разумное объяснение этого феномена, когда теория расходится с практикой [169]. ОВ, находящееся в эксплуатации и подвергавшееся механической нагрузке или имеющее заводские дефекты, связанные с нарушением технологии его изготовления может содержать трещины [176, 177]. Трещины могут сформироваться при его вытяжке при намотке на барабан или при растяжении. Прочность ОВ снижается из-за наличия микротрещин Гриффитса, соответственно снижается его срок службы в реальных условиях эксплуатации ВОК в системах телекоммуникации. Реальный срок службы ВОК можно оценить только с определенной долей вероятности [169]. Исследования с помощью электронного микроскопа показали, что тестируемые отрезки содержали микротрещины, которые распределялись случайным образом и снижали прочность ОВ в сравнении с теоретическими выводами. Нанесение защитного покрытия позволило частично ликвидировать проблему раскрытия трещин и склеить их. Фотография ОВ с образовавшейся в нем трещиной представлена на рисунке 11. Была разработана компьютерная модель ОВ, подвергнутого механическому воздействию, модель выполнена в программе ANSYS, по результатам моделирования был построен график, показывающий снижение прочности ОВ при увеличении уровня нагрузки, при этом были внесены поправки, учитывающие снижение прочности ОВ при наличии в нем трещин. Используя закон распределения Вейбулла и его формулы, можно с определенной долей вероятности рассчитать время эксплуатации ОВ, а также оценить вероятность разрушения ОВ при той или иной нагрузке. По результатам численного моделирования прочности ОВ, был построен график по оценке доли вероятности разрушения ОВ, который представлен на рисунке 12 [169].

Используя известные формулы [178], был выполнен расчет, который показал, что прочность ОВ снижается при наличии в нем усталостных трещин,

так как у вершины трещины формируется концентратор механических напряжений, при увеличении нагрузки происходит увеличение трещины и ее раскрытие (Приложение Г)

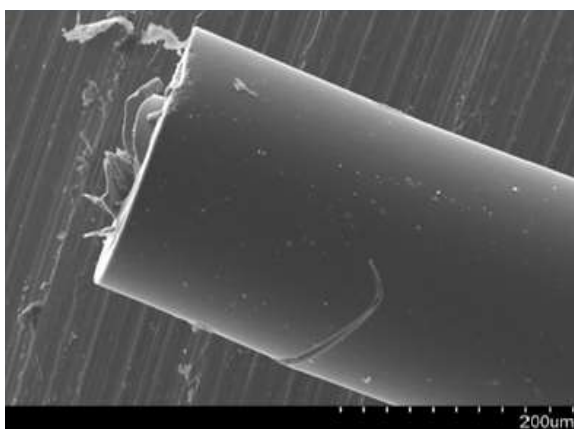


Рисунок 11 – ОВ стандарта G652 с образовавшейся в нем трещиной

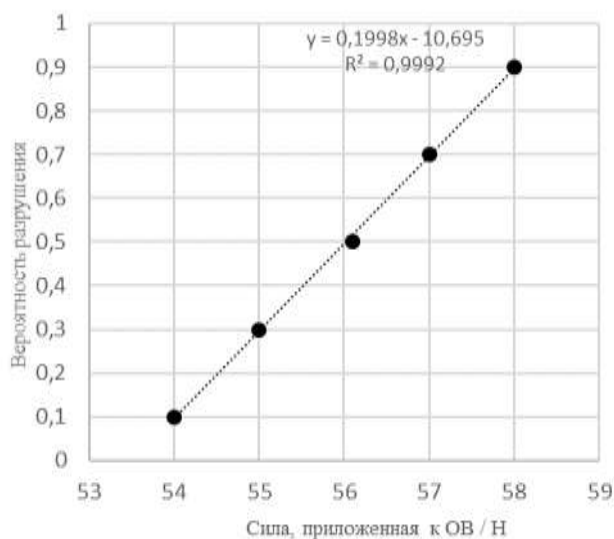


Рисунок 12 – График зависимости доли вероятности разрушения ОВ в зависимости от приложенной силы

Нагрузку на ОВ допускается увеличивать, до значения НДС σ при условии, что σ_c меньше, тогда разрушения ОВ не происходит, при условии если σ будет больше σ_c , тогда наблюдается неустойчивый рост трещин и ОВ может быть разрушено. При помощи программы ANSYS выполнено моделирование НДС для нагруженного ОВ. С помощью ANSYS была получена визуализация картины

распределения НДС при нагружении ОВ. На рисунке 13 представлена деформация ОВ.

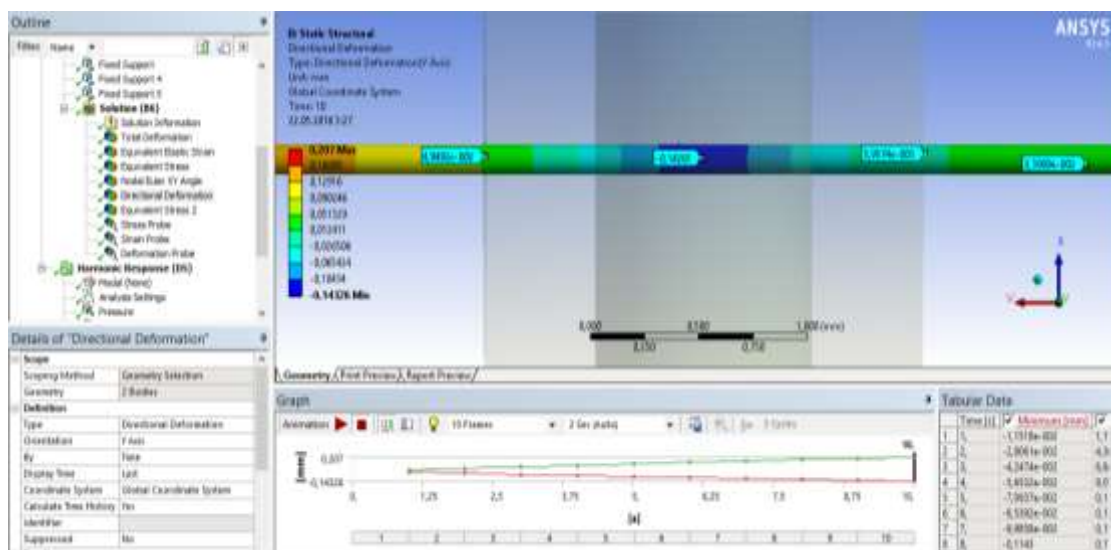


Рисунок 13 - Компьютерная модель ОВ при растяжении

В процессе ОВ было закреплено и растягивалось, с течением времени и увеличением нагрузки в нем образовывались трещины [169,178]. Нагрузка увеличивалась с одинаковым шагом, в течение 10 секунд. ОВ выполнено из кварцевого стекла, его деформация описывается законом Гука ($\sigma = E \cdot \epsilon$) в широком интервале НДС от начального момента до разрушения, относительное удлинение ОВ связано с НДС. Моделирование выполнялось с учётом цикличности приложения нагрузки, так как ВОД заключается внутри ВОК и подвергается растяжению и сжатию, что со временем формирует УТ в теле ОВ. На процесс формирования трещин оказывает влияние амплитуда изменения НДС, длительность приложения нагрузки и количество циклов [169]. Выявлено незначительное расхождение с результатами моделирования и натурных экспериментов, в случае моделирования максимальная допустимая нагрузка при растяжении была менее 15%. (рисунок 14).

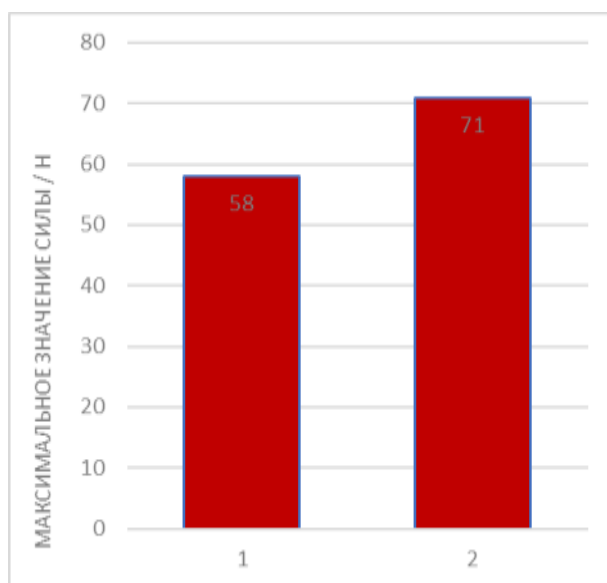


Рисунок 14 – Сравнение результатов

1- результат эксперимента; 2 - результат моделирования

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 меньшая чем модуль Юнга материала ОВ. Покрытие имеет другое назначение, оно склеивает трещины и ограничивает их развитие (рост), а также обеспечивает защиту от воздействия влаги и различных загрязнений. Исследования показали, что если относительное удлинение ОВ не превышало значение 0,8 % от его общей длины, то его срок службы по прогнозу может быть не менее 20-25 лет [169]. Если ВОК имеет длину 1000 метров, то его удлинение допускается до 8 метров (рисунок 15).

Покрытие повышает надёжность ОВ, а значит и ВОД, поэтому его использование для построения распределенного или квази-распределенного ВОД является обязательным. Если нужно существенно повысить прочность ОВ примерно в два раза и более, то нужно применять покрытия, содержащие металл, например, легировать покрытие титаном, это также позволит снизить деградацию и старение ОВ до 30 %.

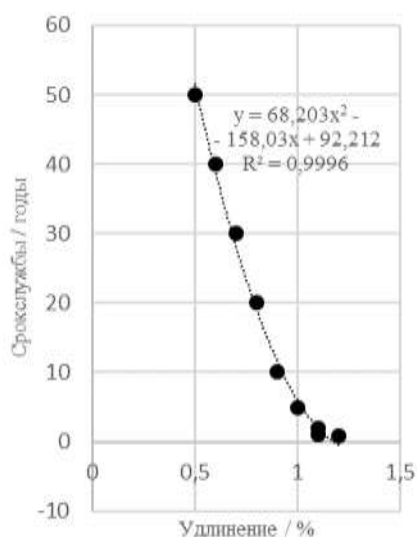


Рисунок 15 – Зависимость срока службы ОВ при его относительном удлинении

Если разрыва ВОК не происходит, то удлинение ОВ внутри ВОК незначительно и не превышает значение 0,3 % от его длины, так как ВОК не изменяет свою длину в большем значении при эксплуатации. Можно предположить, что срок службы ВОК будет в пределах 50 лет, так как его удлинение будет не критичным. Для ОВ, находящегося внутри ВОК, опасность представляет не общее удлинение (растяжения) при изменении температуры во время сезонов года (зима, лето), а локальное удлинение на коротком участке, когда возникла проблема с подвеской на точках крепления, что возможно при эксплуатации. В таком случае АПКТК способен установить, что ОВ растягивается и подвергается опасности разрушения, даже несмотря на элементы усиления, контроль на ранних этапах изменения НДС является весьма важным, так же как установка точного места формирования трещины в ОВ. Внутри ВОК находятся силовые элементы, которые обеспечивают защиту ОВ от разрыва, но если нарушена технология монтажа или повреждены устройства крепления, то ВОК имеет значительную длину провисания и под собственным весом растягивается. В ВОК необходимо закладывать резервные ОВ для большей надежности ВОД, нужно иметь от 2 до 4 резервных ОВ для формирования ВОД. Еще можно контролировать целостность конструкций и арматуры для крепления ВОК [169].

Результаты моделирования изгиба (микроизгиба) ОВ были опубликованы в статье, посвященной разработке физической основы для ВОД, используемых для измерения давления. Основой данных ВОД является фотоупругий эффект при микроизгибе ОВ [160]. Программа ANSYS использовалась для моделирования ВСВ воздействия на ОВ при формировании микроизгиба. ANSYS использует метод конечных элементов. ОВ было размещено на демпфере (резина), воздействие на ОВ выполнено при помощи двух стальных стержней с диаметром 1 мм. Были установлены граничные условия, при которых нагрузка задавалась от 1 до 10 МПа и прикладывалась на стальные стержни. При этом с каждым шагом увеличивалась на 1 МПа, время длительности одного шага составило 1 секунду. Всего было сделано 10 шагов. Перемещение ОВ по осям ОХ, ОУ, ОZ равняется 0 [160]. На рисунке 16 представлена визуализация картины НДС с отображением распределения НДС (рисунок 16).

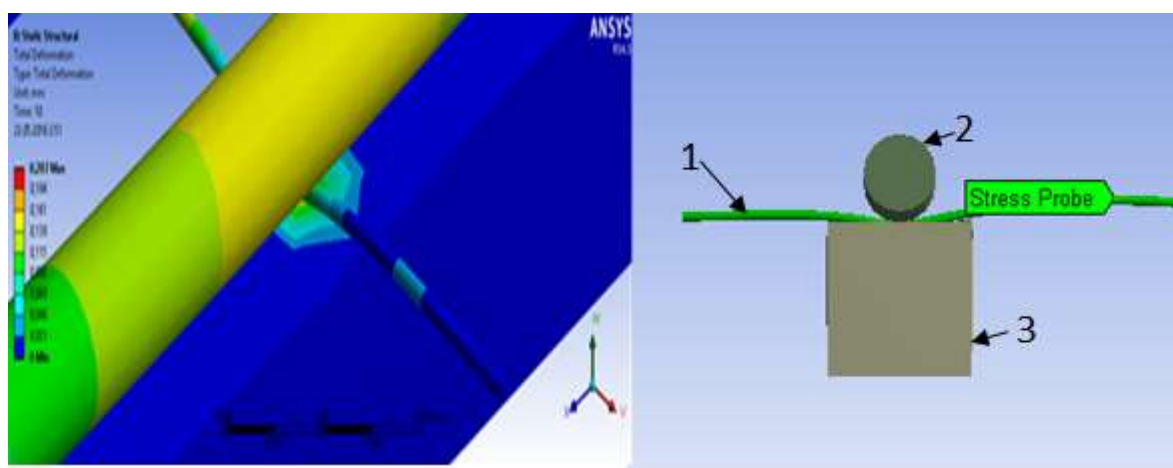


Рисунок 16- Конструкция тестирования волокна на механические воздействия

1 – ОВ, 2- стальной стержень, 3- демпфер

Полученные данные позволили построить график роста параметров НДС при пошаговом увеличении нагрузки на стальные стержни диаметром 1 мм. График имеет достаточно хорошую линейность, механические напряжения σ сформированы в ОВ, в случае пошагового роста нагрузки на металлические стержни, а значит, и на само ОВ, представлен на рисунке 17 [160].

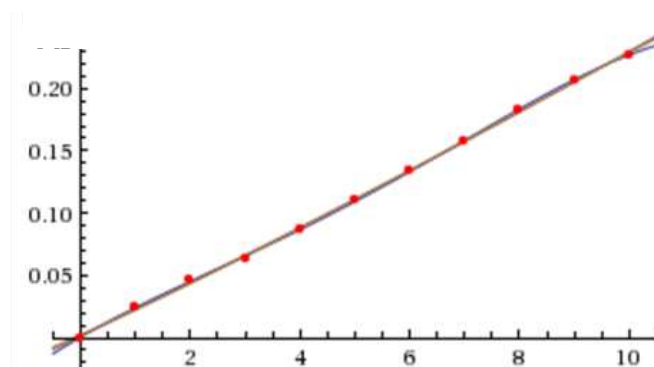


Рисунок 17 – Рост НДС при воздействии на ОБ

Компьютерная модель выполнена в программе ANSYS. Моделирование воздействия на ОБ в двух точках представлено на рисунке 18. Построена компьютерная модель, когда на ОБ оказывается механическое воздействие сразу в двух точках, результаты исследований уже были опубликованы ранее автором диссертации, с которыми можно ознакомиться в статье [179].

На рисунке 18 представлена визуализация НДС при изменении нагрузки от 1 до 10 МПа, шаг равен 1 МПа, время приложения нагрузки 10 секунд, шаг нагрузки равен одной секунде.

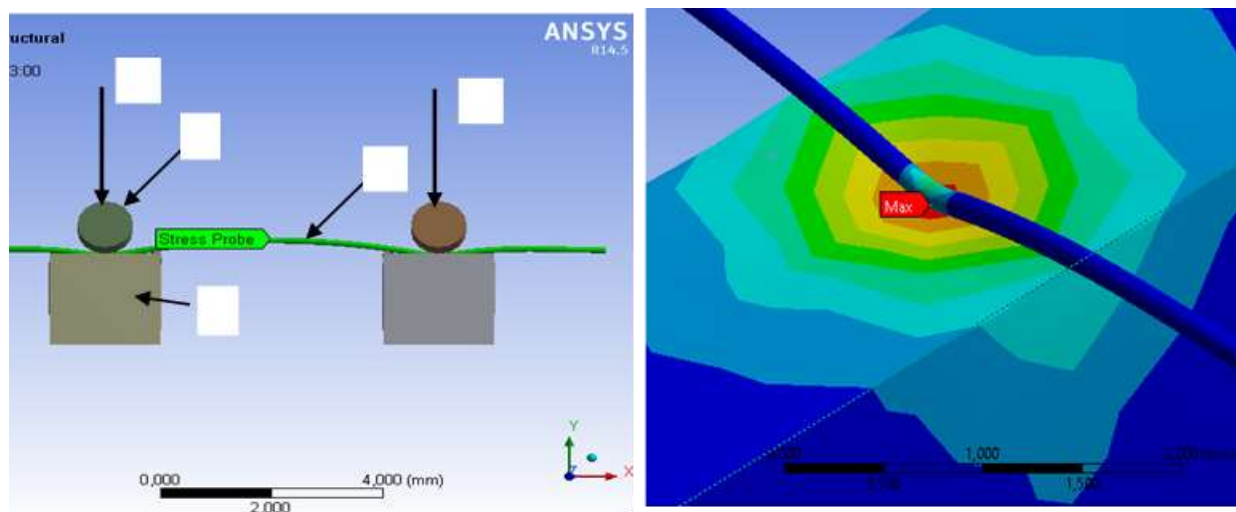


Рисунок 18 – Визуализация НДС

1 – ОБ, 2 - стальные стержни, 3 - упругая резиновая подкладка

Представленная картина визуализации НДС имеет разделение по цвету, что позволяет понять, где находится зона максимальных и минимальных механических напряжений. На экран выводится численное значение параметров НДС. Зависимость НДС от приложенной нагрузки подчиняется линейному закону [179], где можно ознакомиться с результатами моделирования. Оценка надежности математической модели выполнена с учетом отклонение СКО%. Качество моделей оценивается по критерию Фишера (F) для обработки данных используется программа ANETR [160,179].

Расстояние между стальными стержнями равняется 4 мм. ОВ было закреплено одним концом к неподвижной области и подверглось растяжению при воздействии стержней на ОВ, при этом оно прогнулось на резиновом демпфере 0,207 мм, на рисунке 19 представлен снимок экрана компьютера.

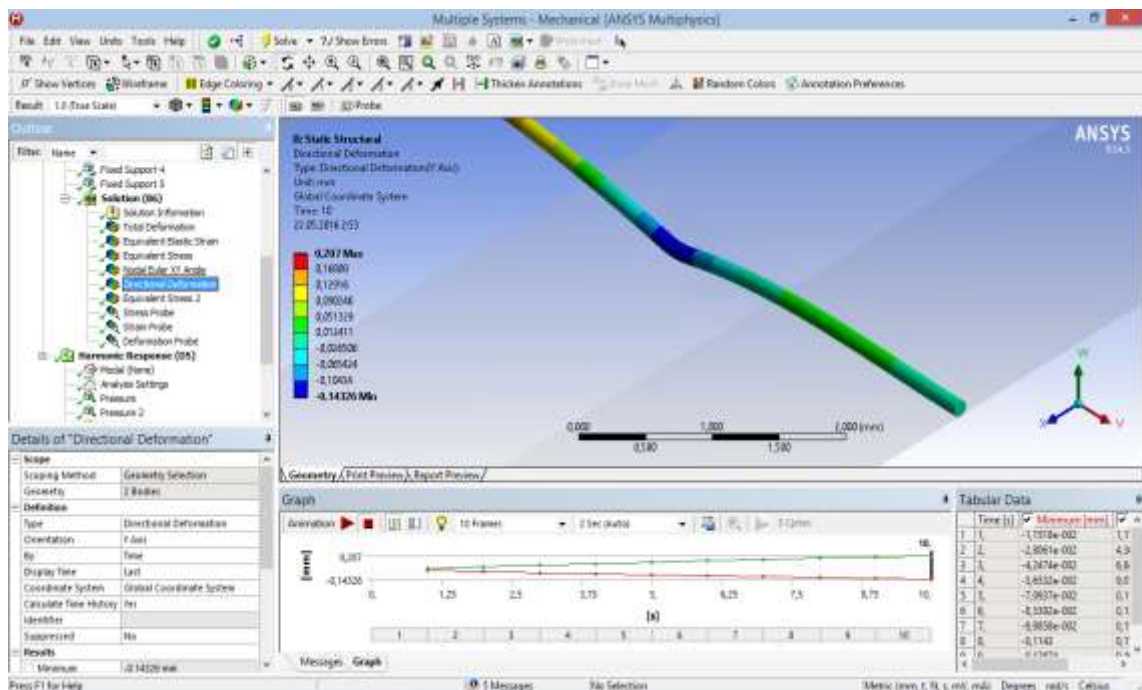


Рисунок 19 - Результаты моделирования

Для проведения компьютерного моделирования была разработана 3 D модель (рисунок 20), созданная в программе ANSYS, ОВ является ВОД и размещено внутри ВОК, это первичное условие.

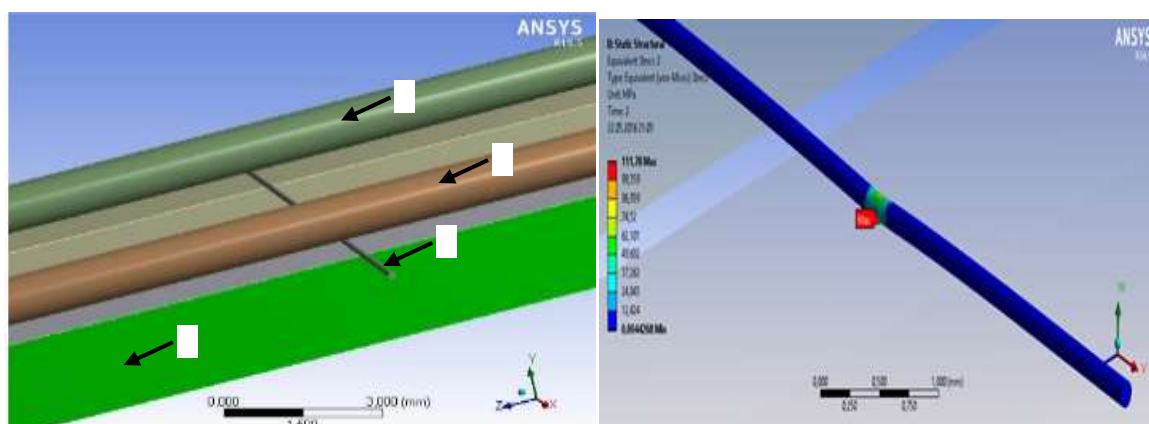


Рисунок 20 – Компьютерная модель ВОД

1-основание; 2 -металлические стержни; 3 -оптическое волокно

Также были использованы методы компьютерной визуализации, симуляции и трехмерного моделирования НДС при помощи программы COMCOL. Данный программный продукт обладает достаточно широкими возможностями и инструментарием для выполнения инженерных расчетов и научных исследований. Многие исследователи отмечают его преимущества как наиболее эффективное средство для моделирования различных конструкций, устройств и процессов для многих областей науки или техники. При помощи COMCOL можно провести анализ отдельных или взаимосвязанных между собой физических процессов, решить сложные контактные задачи. Также как ANSYS, COMCOL основан на математическом методе конечных элементов и позволяет реализовать все этапы компьютерного моделирования. Создается геометрическая 3D модель, причем можно использовать другие графические программы, например AutoCAD или иные аналоги. Программа COMCOL имеет те же инструменты для задания свойств объектов и разбиения их на конечные элементы, также как ANSYS, позволяет выполнять численный расчёт и анализ НДС. Программа COMCOL позволяет визуализировать картину НДС при нагружении ВОК со встроенным в него ОВ. Компьютерная модель ВОК с ОВ показана на рисунке 21.

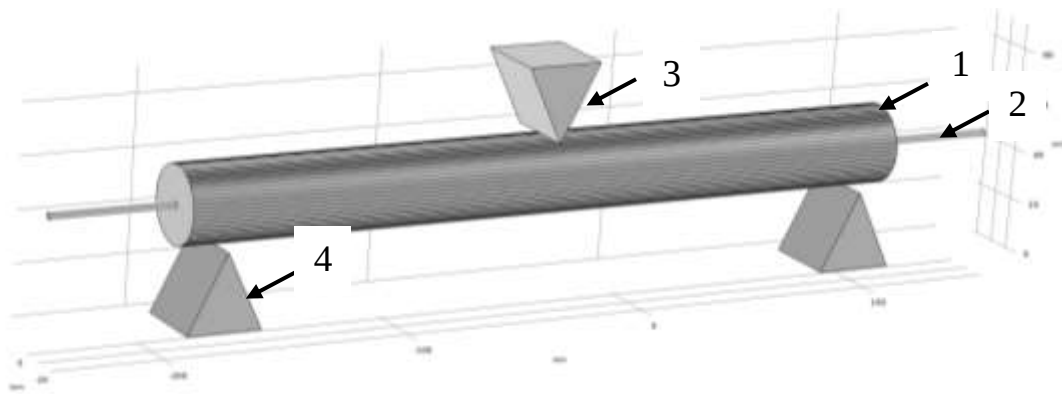


Рисунок 21 – Компьютерная модель ВОК

1 – имитационная модель ВОК; 2 – ОВ; 3 – элемент давления на ВОК; 4 – две неподвижные опоры.

На рисунке 22 показана визуализация картины НДС, когда на ВОК была приложена нагрузка и в центре образовался прогиб. На рисунке также представлены зоны с распределением НДС, для показания каждой зоны используется разный цвет. Можно также сказать, что максимальные значения НДС сконцентрированы в центре ВОК в том месте, где была приложена нагрузка. Так как ОВ находится внутри ВОК, то оно воспринимает все деформации и нагрузки, которые ведут к его изгибу и изменению параметров преломления, а также свойств проходящей световой волны по сердцевине ОВ. Подтверждена гипотеза, которая была выдвинута ранее о том, что ОВ будет воспринимать все нагрузки, находясь внутри ВОК, соответственно ОВ может быть эффективным ВОД.

В случае деформации ОВ в нем формируется микроизгиб, что приводит к возникновению фотоупругого эффекта, а это влечет изменения параметров интенсивности световой волны и сопровождается ростом дополнительных потерь оптической мощности. На рисунке 23 показана ситуация с прогибом ВОК и ОВ

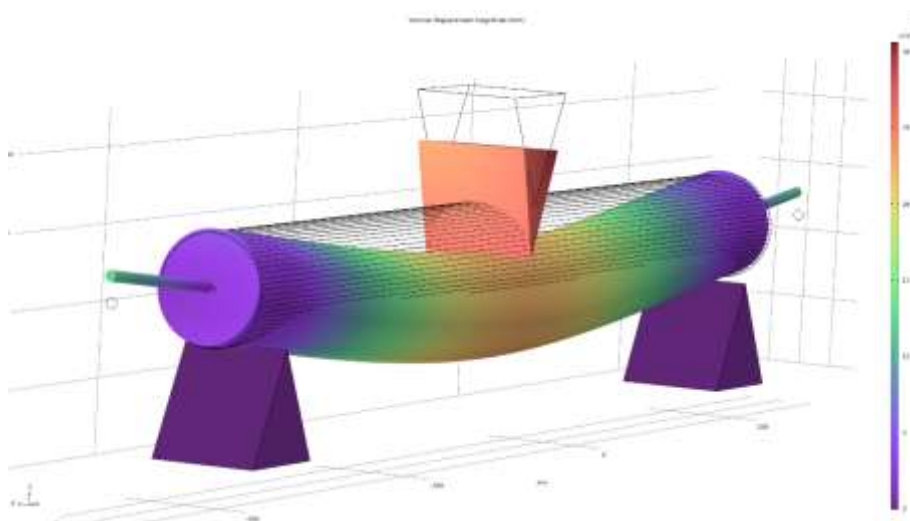


Рисунок 22 - Визуализация картины механических напряжений

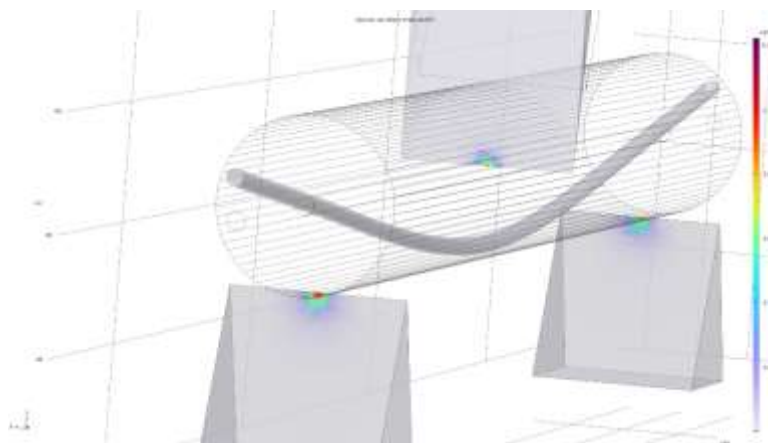


Рисунок 23 – Деформация ВОК и ОВ

В Приложении Д представлены результаты анализа распределения НДС по ВОК и выполнен расчет НДС по зонам его возникновения от середины к краю ВОК. ВОК разделен на три зоны НДС, где отмечены свои значения НДС.

Моделирование дополнительных потерь, сформированных в оптическом волокне в случае микроизгиба, вызванного механической нагрузкой, представлено в Приложении Д. Алгоритм моделирования и обоснование выбора параметров конечных элементов для моделирования представлен в Приложении Е.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Сделаны выбор и обоснование среды трехмерного компьютерного моделирования, а также выполнена визуализация механических напряжений и деформаций ВОК с ОВ. ANSYS и COMCOL и выполнено решение контактной задачи.

2. Дополнительные потери, связанные с изгибом ОВ, это наиболее частый вид потерь, типичный для эксплуатации ВОК (ОВ). Наибольшие потери в оптическом волокне вызывают изгибы с малым или критическим радиусом. Установлено, что микроизгиб ОВ может стать причиной формирования трещин и повреждений ОВ, которые впоследствии вызывают рост затухания оптической волны. Доказано, что на больших длинах волн величина потерь меньшая, так как уровень рассеяния меньше, но при этом ОВ на больших длинах волн имеет большие потери при изгибе ОВ, при этом возникает известный фотоупругий эффект, приводящий к изменению свойств оптической волны, проходящей по ОВ.

3. Исследования показали, что если относительное удлинение ОВ не превышало значение 0,8 % от его общей длины, то его срок службы по прогнозу может быть не менее 20-25 лет [169]. Если ВОК имеет длину 1000 метров, то его удлинение допускается до 8 метров.

4. Определен коэффициент преломления для ОВ стандарта G652, которое используется в ВОД. Коэффициент преломления равен значению $n_1 = 1.4570$ для оболочки и $n_2 = 1.4625$ для сердцевины. Установлено, что для одномодового ОВ стандарта G652 характерен ступенчатый профиль, подчиняемый закону нормального распределения Гаусса.

5. Разработана физико-математическая модель процессов протекания внешнего оптического сигнала, который проходит по одномодовому ОВ стандарта G652. Сигналы могут трансформироваться в визуальные сигналы, а именно в форму пятна Пуассона с гауссовским распределением, это обеспечивает контроль технического состояния ВОК с помощью оптических методов.

6. Предлагаемая методика основана на использовании эффекта микроизгиба, при котором возникают дополнительные потери и часть оптического излучения выходит из сердцевины в оболочку, а также покидает ОВ. Пунктирной линией показана часть излучения, которое выходит из ОВ. На входе уровень мощности выше, а на выходе ниже, часть излучения выходит из ОВ.

7. Показатель преломления ОВ можно представить как совокупность физических параметров $n_{\infty}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0)$. Эксперименты показали, что деформацию ВОК можно контролировать по потерям мощности.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, РАЗМЕЩЁННЫХ В ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ

3.1 Общие вопросы и основа предлагаемой методики контроля

В ранее опубликованных статьях [183,184], связанных с направлением настоящей диссертации, были проведены исследования зависимости роста дополнительных потерь в зависимости от увеличения нагрузки на боковую грань ОВ. Как сказано ранее, фотоупругий эффект возникает при механическом воздействии на боковую грань ОВ, что вызывает изменение коэффициента преломления. В экспериментах использовано одномодовое ОВ стандарта ITU-T G.652.D. Для построения ВОД распределенного или квазираспределенного типа необходимо использовать несколько устройств, в первую очередь, это источник излучения, само ОВ, а также блок для обработки данных с устройством вывода информации. В блоке обработки данных находятся лазер и фотоприемник. Излучение лазера следует по сердцевине одномодового ОВ по всей его длине и падает на поверхность фотоприемника. Фотоприемником является фотоматрица высокого разрешения, которая осуществляет контроль изменений параметров оптической волны, а именно изменения интенсивности ПС. ПС формируется на чувствительной поверхности многопиксельного фотоприемника. Упрощенная схема ВОД представлена на рисунке 24. Если на ОВ оказано воздействие в точке 6, где сформировался микроизгиб и где имеет место выход луча в окружающее пространство, то покинутая часть световой волны будет являться дополнительными потерями, которые напрямую связаны с интенсивностью светового пятна. Чем больше дополнительные потери, тем больше снижение интенсивности, то есть зависимость прямо пропорциональна и подчиняется линейному закону. Стрелками показано движение световой волны по ОВ.

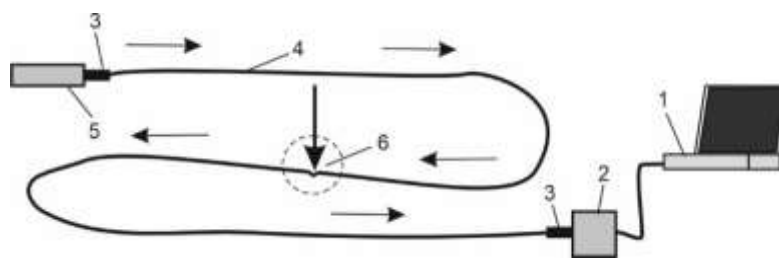


Рисунок 24 – Упрощенная схема ВОД

1- персональный компьютер с ПО; 2- устройство обработки данных с фотоприемником; 3- оптический коннектор; 4 - ОВ, 5 - источник излучения (полупроводниковый лазер) с длиной волны 650-1550 нм; 6 – точка механического воздействия на ОВ

Лазер, как правило, находится с одной стороны ОВ [183,184], а фотоприемник - с другой стороны ОВ. Если на ОВ оказывается ВСВ или иное виброакустическое воздействие, то происходит изменение параметров ПС. Эти изменения фиксирует фотоприемник. Далее уже АПКТК выполняет обработку данных и выдает численное решение. АПКТК отсеивает случайные помехи и распознает их. Предлагаемая методика оптико-цифрового анализа выполняет оценку изменения картины пиксельного светового пятна по оболочке ОВ.

Показатели преломления ОВ отвечают неравенству $n_1 < n_2$, выбраны показатели сердцевины $n_2 = 1,4625$ и оболочки $n_1 = 1,4570$. Плотность оболочки более низкая, чем у сердцевины. Для работы ВОД могут применяться полупроводниковые лазеры с различной длиной волны, например, 650, 850, 1310, 1550 нм. Оптическая волна проходит по ОВ, и если на него оказано механическое воздействие, то свойства световой волны изменяются, что фиксируется фотоприемником. Далее фотоприемник выполняет преобразование оптического сигнала в электрический. После преобразования сигнал попадает в устройство обработки и вывода данных. При механическом воздействии на ВОК возникает деформация, которая передается ОВ, и как сказано ранее, механическое воздействие вызывает микроизгиб. Световая волна изменяет свои свойства, в первую очередь изменяется фаза распространения световой волны и ее интенсивность, при этом все изменения фиксируются фотоприемником.

Важным моментом данной работы является поиск собственного нового

технического решения и методики обработки данных для обеспечения принципиально важного отличия от методов оптической интерферометрии, рефлектометрии и волоконных решёток Брэгга, которые уже достаточно изучены и известны. К примеру, если использовать известные методы и конструкции оптической интерферометрии, то АПКТК будет иметь зависимость от температуры ОВ, особенно это будет касаться изменения фазы распространения оптической волны. Установлено, что изменения фазы распространения оптической волны происходят при изменении внешней температуры менее чем на 1 °С, что в принципе является незначительным, но даже эта разница может нарушить работу интерферометра. При использовании методов оптической рефлектометрии или решеток Брэгга АПКТК будет иметь более высокую стоимость из-за использования дорогостоящих комплектующих, а также применения высокотехнологического оборудования. В данной работе реализуется идея оптико-цифрового анализа параметров ПС, расположенного на поверхности фотоматрицы. Фотоприемник устанавливается на торце ОВ на его выходе. Если будет оказано ВСВ на ВОД, развивается известный фотоупругий эффект, что приводит к изменению интенсивности и фазы распространения оптической волны. ВСВ на боковую грань ОВ вызывает увеличение дополнительных оптических потерь, эти процессы используются при работе АПКТК. Увеличение оптических потерь в ОВ могут быть легко зафиксированы фотоматрицей. Использование фотоматрицы является основным отличием от однопиксельного фотоприемника, что является основой известных методов. АПКТК выполняет оптико-цифровой анализ всех изменений пиксельной картины ПС, это является отличием от аналогичных методов, которые фиксируют только изменения рассеяния или интенсивности амплитуды световой волны.

На рисунке 25 показан снимок с экрана компьютера где представлено два изображения светового пятна: позитивное и негативное. Негатив имеет две зоны, обозначенные цифрой 1, это изображение сердцевины ОВ, цифрой 2 обозначено изображение оболочки ОВ. АПКТК осуществляет контроль изменений

параметров светового пятна по оболочке, при этом изменение интенсивности ПС сердцевины из анализа полностью исключается. Предлагаемая методика оптико-цифрового анализа ПС имеет отличия в том, что при ВСВ оптическая волна, проходящая по сердцевине покидает ее пределы, переходит в оболочку и распространяется далее по оболочке ОВ, а фотоматрица фиксирует изменения интенсивности оболочки. Основой являются разработанная методика контроля дополнительных оптических потерь в ОВ и фиксация их уровня при переходе света из сердцевины в оболочку. Представленное на рисунке 25 световое пятно аналогично известному изображению светового пятна Пуассона. Пятно доходит до поверхности фотоматрицы, и формируется картина с более яркой сердцевиной и более темной оболочкой. В оболочке отражены потери световой волны, которые растут при микроизгибе, соответственно их и фиксирует АПКТК. Данное световое пятно отвечает закону нормального распределения Гаусса, при этом оно содержит достаточно значительное количество оптических шумов, которые генерируются самим источником излучения. АПКТК имеет программные алгоритмы для нивелирования помех [187-189]. Позитивное изображение светового пятна не используется в оптико-цифровом анализе, в других методах ведётся контроль интенсивности (яркости) именно сердцевины. В предлагаемой методике оптико-цифрового анализа контролируется изменение светового пятна по оболочке, так как потери распространяются именно по оболочке. Оболочка в позитивном изображении выглядит более тусклой, а вот сердцевина является более яркой, но при этом не информативной. АПКТК преобразует изображение светового пятна в негатив, соответственно оболочка становится более яркой. Предлагаемая методика в своей основе контролирует изменение дополнительных потерь, которые формируются только в оболочке.

Важным обстоятельством стабильной работы АПКТК является стабильность работы полупроводникового лазера, для этого нужно применять стабилизатор тока и напряжения. Допустимое отклонение длины волны источника излучения допускается на уровне не более 5 нм, важным является то обстоятельство, что лазер должен быть когерентным.

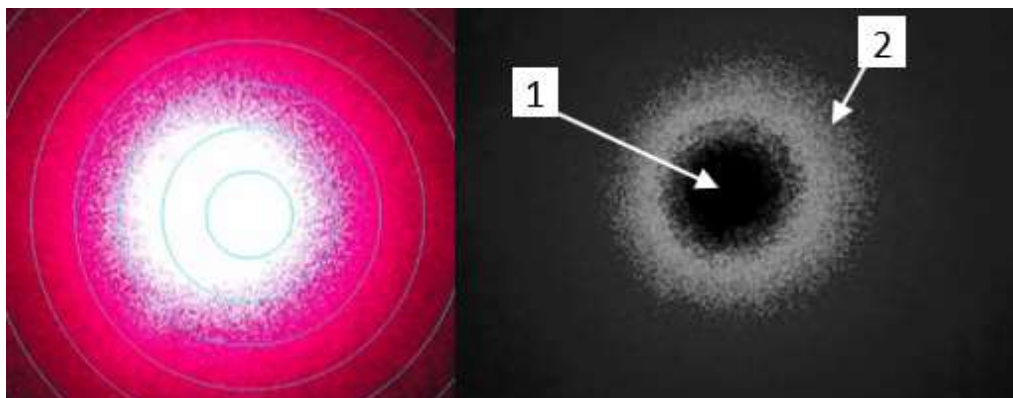


Рисунок 25 - Изображение ПС на поверхности фотоматрицы

1- сердцевина; 2- оболочка.

Длина волны может быть 650 - 1550 нм, в экспериментах использованы различные длины волн 650, 1310, 1550 нм. Установлено, что чем выше длина, тем будет меньше ее затухание в ОВ, это обстоятельство необходимо учитывать, когда ВОД имеет значительную протяженность.

АПКТК преобразовывает изменения параметров ПС, при изменении его интенсивности с фиксацией уровня дополнительных оптических потерь с дальнейшим формированием изменения картины пикселей. На рисунке 26 показано, как изменяется картина пикселей ПС при ВСВ. Также видно, что увеличение силы воздействия на ОВ вызывает переход пикселей от черного цвета к белому. Чем выше уровень приложенной силы на ВОД, тем больше микроизгиб и выше уровень дополнительных потерь. Соответственно больше снижение интенсивности светового пятна и больше дополнительных потерь, а также большая часть световой волны распространяется по оболочке ОВ. После анализа, выполненного АПКТК, картина пикселей меняется соответственно, наблюдается рост количества белых пикселей. На рисунке 26 представлен случай увеличения нагрузки на ВОД и рост количества белых пикселей, позиция 1, это незначительное воздействие, количество меньшее в сравнении с позицией 2 и 3, когда было оказано более существенное по силе воздействие. Естественно, при более сильном воздействии рост белых пикселей более значительный, так, как на

ОВ. Это касается случая воздействия на охраняемый ВОК при попытке НД [187-189].



Рисунок 26 - Снимок с экрана компьютера

Можно отметить, что световое пятно, имеет неровности своих очертаний, особенно это видно на границе раздела ядра и оболочки ОВ. АПКТК позволяет различать воздействие на ВОД и оценить помехи, которые сформированы внешними воздействиями, например, изменением внешней температуры или порывом ветра, качающего ВОК. На рисунке 27 при помощи белых стрелок обозначены одиночные белые пиксели: это помехи, которые порождены различными внешними влияниями или некогерентностью лазера, что выражается в незначительном количестве белых пикселей, их число сильно отличается в сравнении с числом белых пикселей, появившихся на экране при ВСВ на ОВ. График показывает рост белых пикселей в пределах от двух до девяти пикселей, а затем наблюдается спад до одного пикселя. Количество белых пикселей, сформированных помехами, является незначительным, так как их рост может достигать нескольких миллионов.

В процессе проведения экспериментов обнаружено, что в измерительном канале возникают помехи, которые обусловлены некогерентностью источника излучения и его шумом, но они порождают минимальное количество белых пикселей в отличие от механического воздействия при несанкционированном доступе к охраняемому ВОК.

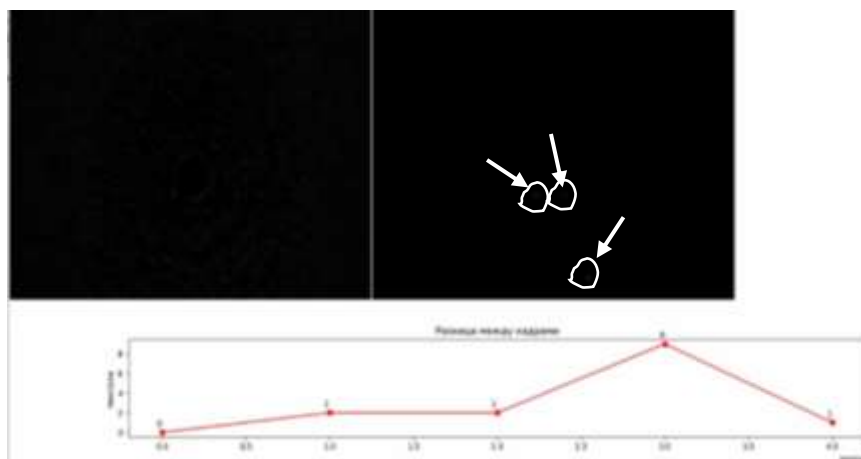


Рисунок 27 - Момент запуска АПК

Предлагаемый АПКТК имеет достаточно высокую помехозащищенность измерительных каналов. АПКТК выполняет анализ изменения пиксельной картины светового пятна и выдает решение о срабатывании сигнализации, если это случай НД. АПКТК оценивает количество воздействий и их частоту, интенсивность и периодичность, если имеется превышение установленных пределов, то АПКТК выдает сигнал тревоги. Если на ВОК оказать ВСВ, это спровоцирует изменение интенсивности ПС, а значит, и картины пикселей. Чем сильнее воздействие, тем больше будет переход пикселей от черного цвета к белому. В процессе экспериментов было зафиксировано несколько неоднократных воздействий, превышающих уставку [187-189]. При этом сработала сигнализация, которая необходима для защиты от НД [187-189]. АПКТК имеет возможность изменять свою чувствительность ступенчато, особенно это важно при возникновении внешних помех. Помехи всегда отличаются по частоте и скорости изменения интенсивности от воздействия на ВОК при попытке НД, то АПКТК не реагирует на них. Методика обеспечивает контроль изменений производной интенсивности ПС и увеличения дополнительных потерь с течением заданного отрезка времени. АПКТК может контролировать изменения не только интенсивности ПС, но и его формы. АПКТК выполняет численный анализ уровня ВСВ на ОВ при микроизгибе в режиме реального времени [187-189].

3.2 Исследование дополнительных потерь в ОВ при его изгибе

В данном разделе приведены сведения, касающиеся исследования дополнительных потерь. Некоторые результаты уже были опубликованы автором ранее в статьях [179,180]. Для контроля дополнительных потерь и светопропускания по ОВ был использован комплект приборов, который состоял из двух частей, источника оптического излучения с диапазоном 900-1625 нм с отклонением в пределах ± 10 нм, производитель VIAVI (JDSU) SmartPocket OLS-34 (США), информацию о технических характеристиках можно получить на сайте [190]. Для потерь был использован измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38 (США), абсолютная погрешность измерения которого составляет $\pm 0,2$ дБ ($\pm 5\%$), диапазон длин волн от 780 до 1650 нм, информацию о технических характеристиках можно получить на сайте [191]. На рисунке 28 представлены приборы, использованные для измерения дополнительных потерь [179,180]. Также для измерения дополнительных потерь и обратного рассеяния, был использован оптический рефлектометр типа OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) производства YOKOGAWA AQ1200E (Япония). Для снижения влияния мертвой зоны была включена последовательно компенсационная катушка с ОВ, длиной $L=0,2$ км. Рефлектометр OTDR YOKOGAWA AQ1200E показан на рисунке 29. Данный прибор обладает высокой точностью измерения потерь в пределах ± 0.05 дБ. Ознакомиться с принципом работы рефлектометра OTDR YOKOGAWA AQ1200E и его характеристиками можно на сайтах [192,193], там же можно найти информацию о правилах расшифровки полученных при измерениях рефлектограмм. Мертвая зона при измерении ослабления оптической волны 4 м, при измерении положения неоднородности 0,8м. Рабочие длины волн: 1310 ± 25 , 1550 ± 25 , 1625 ± 10 нм [179,180].

Оптический рефлектометр типа OTDR выполняет усреднение показателей дополнительных потерь за установленный промежуток времени и выдает в конечном итоге рефлектограмму. Вносимые дополнительные потери

формируются неоднородностями ОВ, например, устройствами коммутации, точками, где выполнена сварка или имеется изгиб ОВ. Измерения потерь формируются в виде численных значений мгновенных значений, после определяется их среднее значение за установленный промежуток времени, а после строится рефлектограмма.



Рисунок 28 - Приборы, использованные для измерения дополнительных потерь

Для проведения опытов использованы одномодовые волоконно-оптические патч-корды длиной 15, 20 и 30 метров, с ОВ стандарта G.652 125/9 мкм, с оптическими коннекторами типа FS и CS. ОВ помещается в буферную оболочку диаметром 2,8 мм (PVC), с кевларовым силовым для повышения механической прочности при растяжении. Лабораторный стенд в своей основе имеет лист фанеры толщиной 12 мм, в которую вкручиваются металлические саморезы (рисунок 29). На основании размещается пять зон, что позволяет имитировать практически любые углы изгиба ОВ и их количество. Оптические патч-корды длиной от 15 до 30 метров наматывались на саморезы для формирования необходимого угла. Оптические патч-корды длиной менее 15 метров не использовались, так как данной длины недостаточно для намотки и имитации

изгибов, а также необходимо учитывать мертвую зону рефлектометра. На рисунке 29 показан процесс намотки ОВ на каркас для имитации углов изгиба [179,180].

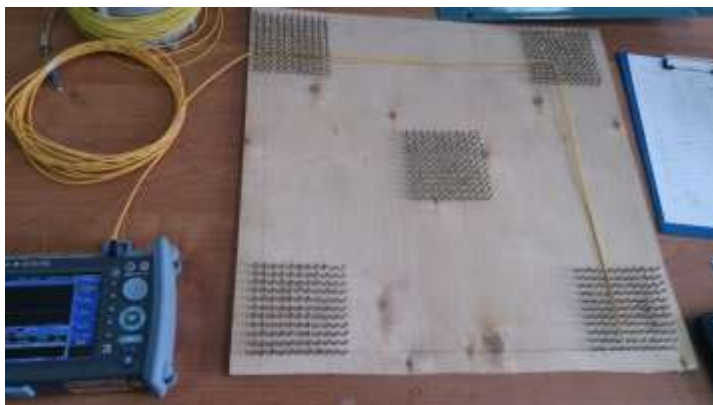


Рисунок 29 – Лабораторный стенд

Рефлектометр рассчитывает длину ОВ по выражению [179,180]:

$$l = K_{\text{отр}} \frac{\Delta t}{2} * \frac{c_0}{\eta_d},$$

где l – длина ОВ, км;

Δt – разность времени между пиками импульсов, с;

η_d – показатель преломления ОВ;

$K_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения;

c_0 – скорость света в вакууме 300 000 км/с. [179,180].

На рисунке 30 представлена условная схема проведения экспериментов. К первому методу можно отнести изменение свойств света при прохождении моды по ОВ, это уже известный эффект светопрохождения. Для этого нужно использовать источник оптического излучения и измерителя - оптический ваттметр.

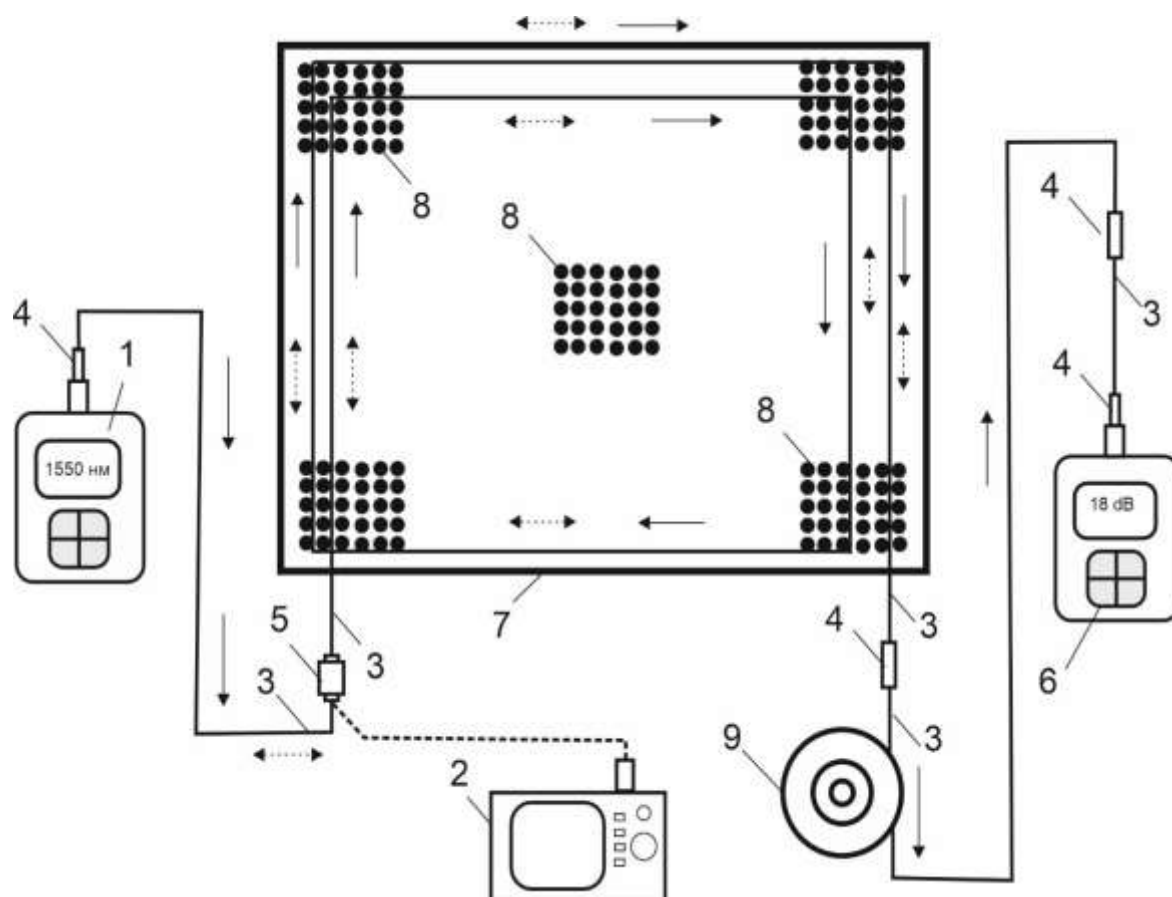


Рисунок 30 – Схема измерений

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 ОВ на направляющие; 9 –компенсационная катушка

При втором методе измерения проводились при помощи оптического рефлектометра типа OTDR. В обоих случаях устанавливалось значение дополнительных потерь. Движение световой волны показано сплошными стрелками от источника излучения (900-1625 нм) к измерителю мощности, а пунктирными стрелками показано движение и отражение световой волны, генерируемой рефлектометром. На основании имеется 5 областей намотки с направляющими для формирования углов 45, 90 и 135 градусов. Области намотки имеют форму квадрата и содержат 11 рядов саморезов с каждой стороны.

Диаметр самореза составляет 6 мм, на который прикреплена втулка из куска медной трубки диаметром 8 мм и высотой 10 мм. Втулка вращается, что обеспечивает натяжку волокна и его безопасную укладку. В экспериментах участвовали патч-корды длиной от 20 до 50 метров. Намотка осуществлялась с небольшой натяжкой для исключения провиса. Все соединения выполнялись при помощи оптических коннекторов типа FS. Первоначально проводились измерения при помощи источника оптического излучения и измерителя оптической мощности. Вторым этапом было проведение измерений с использованием оптического рефлектометра, который был подключен к ноутбуку при помощи соединительного шнура USB. Так как это была вторая часть эксперимента, то на схеме присоединение оптического рефлектометра показано пунктирной линией.

Для точного вычисления критического радиуса изгиба ОВ можно воспользоваться известным выражением:

$$R_{кр} \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}, \text{ мм},$$

где n_1 , n_2 - показатели преломления сердцевины и оболочки;
 λ - длина волны применяемого излучения.

Проведем выбор метода обработки данных эксперимента, будем полагать, что ошибки модели нормально и независимо распределены. Критерий Акаике AIC был использован для оценки качества аппроксимации. Был выполнен выбор нескольких статистических моделей [146-149]. Имеется условие, что n будет числом наблюдений, также учитывается остаточная сумма квадратов. Использован BIC, который является известным информационным критерием, его используют в статистике. Это мера относительного качества статистических (эконометрических) моделей, при этом оценивается степень условной «подгонки» моделей под данные с корректировкой, с учетом используемого количества оцениваемых параметров. Как известно, критерий Акаике (AIC) был первоначально предложен в 1974 году Х. Акаике, он используется как информационный критерий и связан с концепцией информационной энтропии и расстоянием Кульбака-Лейблера. Выполнен регрессивный анализ данных и

установлен коэффициент детерминации (R^2), который рассчитан по формуле [146-149]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где n – число наблюдений;

y_i — значение объясняемой переменной;

$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$ — среднее значение объясняемой переменной;

$\tilde{y}_i$ — модельные значения, построенные по оцененным параметрам.

R^2 имеет размерность от нуля до единицы и отражает долю дисперсии, при этом чем будет ближе R^2 к единице, тем лучше модель.

Для критерия имеется выражение

$$AIC = 2k - 2\ln(L),$$

где k — число параметров в статистической модели,

L — максимизированное значение функции правдоподобия модели.

Для выполнения оценки качества полученных моделей был использован коэффициент детерминации ($Adj R^2$). Данный показатель является скорректированной версией R^2 :

$$Adj R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - k},$$

где k – число факторов.

Коэффициент $Adj R^2$ может иметь значение от нуля до единицы, но он никогда не сможет быть больше, чем значение R^2 . Нужно понимать то, что некоторые характеристики принимают недопустимые значения, так как R^2 и $Adj R^2$ в случае отсутствия константы может стать отрицательным. R^2 является коэффициентом детерминации, а Adjusted R^2 будет скорректированным коэффициентом детерминации R^2 . Было выполнено численное исследование компьютерной модели ОБ с установлением численных значений механических напряжений и деформации. Полученные результаты были обработаны при помощи программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой и

предназначена для компьютерной обработки экспериментальных данных. Программа Wolframalpha разработана математиком Стивеном Вольфрамом, в ней используется система компьютерной алгебры. На рисунке 31 показаны результаты исследований ОВ с использованием длины волны 1625 нм с углом изгиба 45°.

Таблица 1 – Результаты оценки качества аппроксимаций

	AIC	BIC	R ²	Adjusted R ²
quadratic	-92,2717	-91,954	0,996632	0,995284
quartic	-89,7846	-89,308	0,997852	0,994988
cubic	-89,4884	-89,0912	0,996632	0,994106

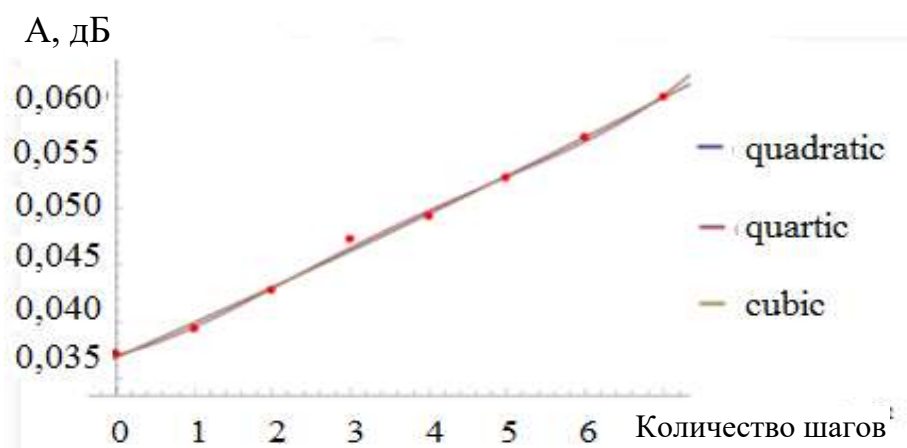


Рисунок 31 – Зависимость значения дополнительных потерь на длине волны 1625 нм, возникающих при изгибах ОВ от 1 до 7, при угле изгиба равным 45°.

Полиномиальная аппроксимация четвертой степени.

$$-0,0000285038P^4 + 0,000420013P^3 - 0,00208816P^2 + 0,00647977P + 0,0537004 = \varepsilon$$

Полиномиальная аппроксимация третьей степени

$$0,0000209596P^3 - 0,000357576P^2 + 0,00414246P + 0,0540424 = \varepsilon$$

Полиномиальная аппроксимация второй степени

$$-0,0001375P^2 + 0,00356607P + 0,0542625 = \varepsilon$$

Результаты исследований, при длине волны 1625 нм при угле изгиба, равно 90° (рисунок 32).

Таблица 2 – Результаты оценки качества аппроксимаций

	AIC	BIC	R ²	Adjusted R ²
quadratic	-93,5507	-93,0741	0,998304	0,996044
quartic	-91,2797	-90,962	0,99518	0,993252
cubic	-89,1041	-88,7069	0,995534	0,992184

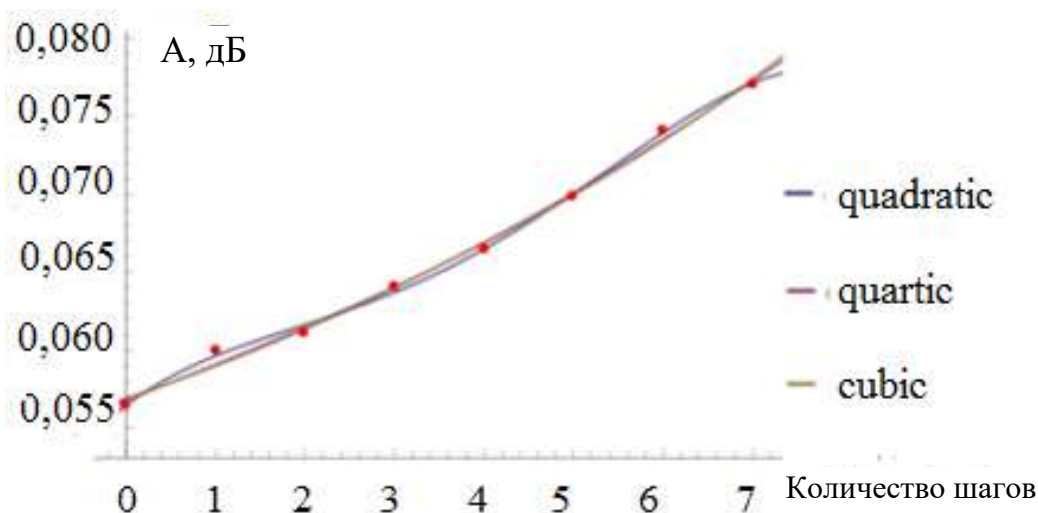


Рисунок 32 – Зависимость значения дополнительных потерь на длине волны 1625 нм, возникающих при изгибах ОВ от 1 до 7, при угле изгиба равном 90°

Полиномиальная аппроксимация четвертой степени.

$$-0,0000234848P^4 + 0,000343434P^3 - 0,00144394P^2 + 0,00428806P + 0,0564561 = \varepsilon$$

Полиномиальная аппроксимация третьей степени

$$0,0000146465P^3 - 0,0000180736P^2 + 0,0023623P + 0,0567379 = \varepsilon.$$

Полиномиальная аппроксимация второй степени

$$0,000135714P^2 + 0,00195952P + 0,0568917 = \varepsilon.$$

Результаты исследований, при длине волны 1625 нм при угле изгиба равном 135° (рисунок 33).

Полиномиальная аппроксимация четвертой степени.

$$-0,0000191288P^4 + 0,000284975P^3 - 0,00122027P^2 + 0,00428126P + 0,0577235 = \varepsilon$$

Полиномиальная аппроксимация третьей степени

$$0,0000171717P^3 - 0,0000588745P^2 + 0,0027127P + 0,057953 = \varepsilon.$$

Полиномиальная аппроксимация второй степени

$$0,000121429P^2 + 0,00224048P + 0,0518333 = \varepsilon.$$

Таблица 3 – Результаты оценки качества аппроксимаций

	AIC	BIC	R ²	Adjusted R ²
quadratic	-90,399	-90,0812	0,995219	0,993306
quartic	-88,8366	-88,36	0,997284	0,993663
cubic	-88,3712	-87,974	0,995651	0,992389

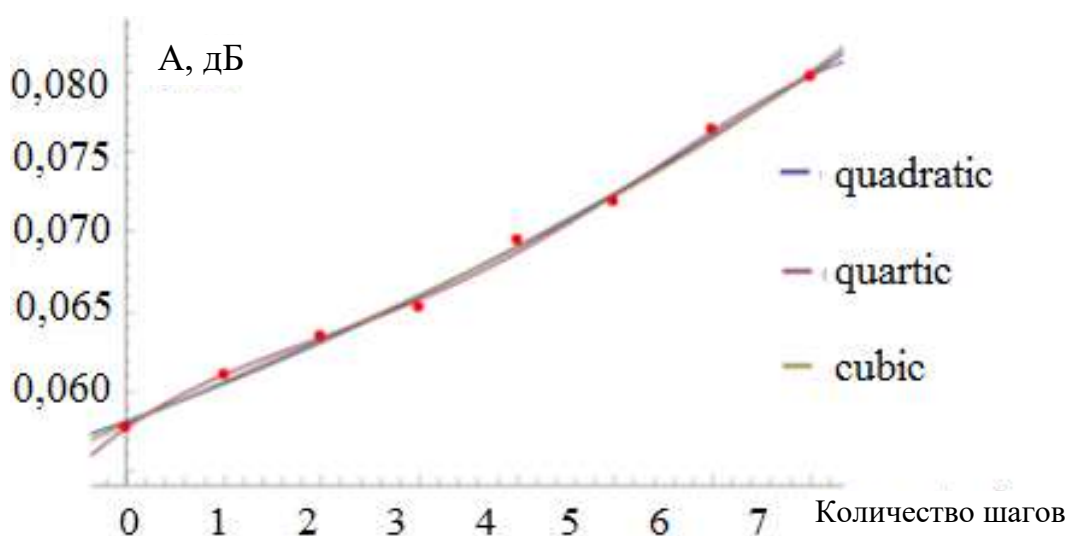


Рисунок 33 – Зависимость значения дополнительных потерь на длине волны 1625 нм, возникающих при изгибах ОВ от 1 до 7, при угле изгиба, равном 135°.

Графики зависимости роста дополнительных потерь при различных параметрах изгиба представлены в Приложении Ж. Там же представлена программа для автоматизированного расчета потерь.

3.3 Контроль дополнительных потерь оптического волокна стандарта G.652 для оценки нагрузки при микроизгибе

Физический принцип работы лабораторного образца волоконно-оптического датчика веса основан на использовании известного метода контроля дополнительных оптических потерь, которые формируются при изгибе ОВ. Условная схема лабораторного стенда показана на рисунке 34.

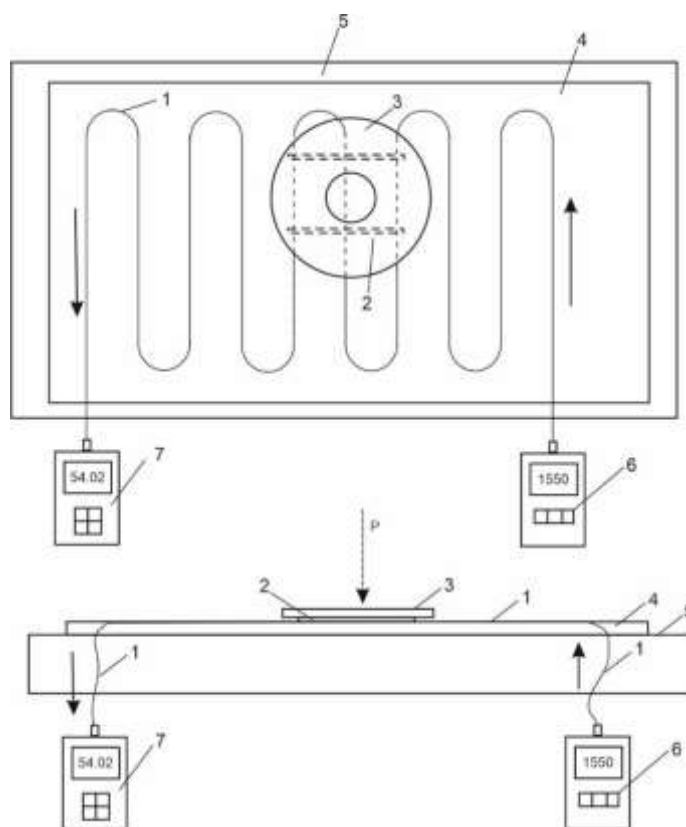


Рисунок 34 – Условная схема лабораторного стенда

1 – оптическое волокно, 2 – металлический стержень, 3 – диск, 4 – демпфер, 5 – основание стола, 6 – источник света, 7 –измеритель оптической мощности.

Условная схема лабораторного стенда конструктивно состоит из источника оптического излучения SmartPocket OLS-35, подключенного к одному концу ОВ, и оптического ваттметра SmartPocket OLP-38, который подключен к другому концу ОВ. Для коммутации применялись универсальные оптические коннекторы типа SC и FC, а также адаптер такого же типа с оптическими ферулами UPP 2.5 мм. При помощи стрелок на схеме показано направление движения оптической волны от источника до оптического ваттметра. Между измерительными приборами находилось одномодовое ОВ стандарта G.652, которое использовано в качестве ВОД [179,180].

Схема работала следующим образом, по ОВ 1 проходила оптическая волна с длиной 1310 или 1550 нм от лазерного источника излучения к оптическому ваттметру. Направления движения оптической волны по ОВ отсечена стрелками.

ОВ используется как чувствительный элемент (ВОД) и располагалось на пластиковом демпфере 4. При этом демпфер располагался на абсолютно твёрдой поверхности стола 5, которая не подвергалась деформации при воздействии нагрузки груза на боковую грань ОВ. Только ОВ подвергалось микроизгибам и в нем возникали дополнительные оптические потери. На схеме показано, в каком направлении оказывалось давление на ОВ. Под диском 3 два металлических стержня 2, которые оказывали прямое воздействие на ОВ. Диаметр каждого стержня равен 1 мм. При проведении экспериментов в качестве сенсора было использовано ОВ стандарта G.652 125/9 мкм. Установлено, что рост дополнительных потерь был пропорционален росту давления на ОВ, то есть чем больше вес устанавливается на диск, тем сильнее стержни давят на ОВ. Данный метод позволяет контролировать вес на расстоянии до 100 км. Точка измерения может находиться на значительном удалении от блока измерения. Например, можно контролировать вес автотранспорта, проезжающего по мосту или определённому участку дороги. Попутно можно измерить скорость передвижения автомобиля, если расположить датчики на определённом расстоянии друг от друга. Также можно контролировать температуру дорожного покрытия. При этом затраты энергии на работу одного удаленного датчика составят менее 1 Вт. На рисунке 35 приведено фото лабораторного стенда.

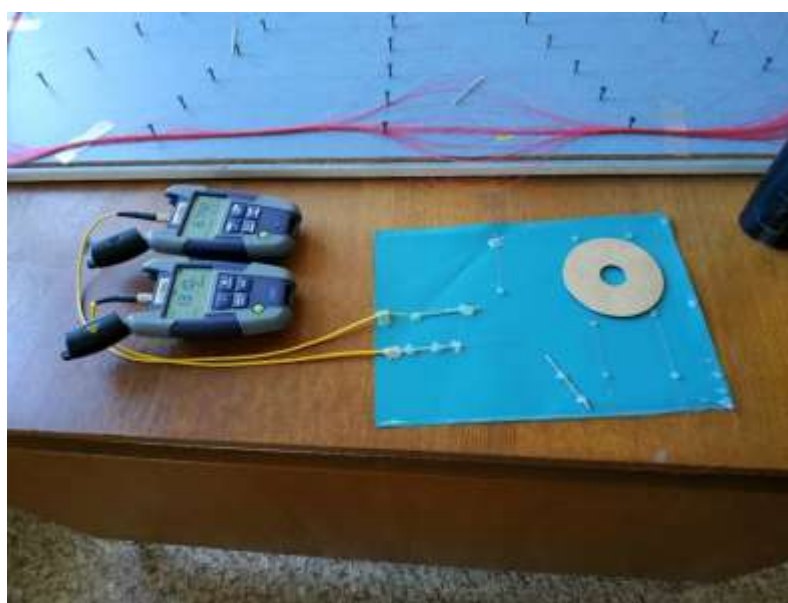


Рисунок 35 – Лабораторный стенд

Согласно первому методу измерения могут проходить по методам обрыва и методы вносимых потерь (рисунок 36).



Рисунок 36 – Метод светопропускания

В данном методе была измерена оптическая мощность между двумя точками, например А и В, точка В должна находиться на конце ОВ, а точка А должна быть вначале ОВ или по возможности, ближе к его началу. Измерение световой мощности Р проводится на конце линии, а потом в точке В, но необходимо учитывать условия ввода между источником света (передатчиком) и световодом. Далее находим коэффициент затухания α (дБ/км) световода, который рассчитывается по формуле

$$\alpha = 10 \lg \frac{P(l_2)}{P(l_1)}.$$

Начальные условия эксперимента: нагрузка задавалась от 1 до 10 кг. Была измерена температура в помещении лаборатории, которая составила 22 °С при относительной влажности 63%.

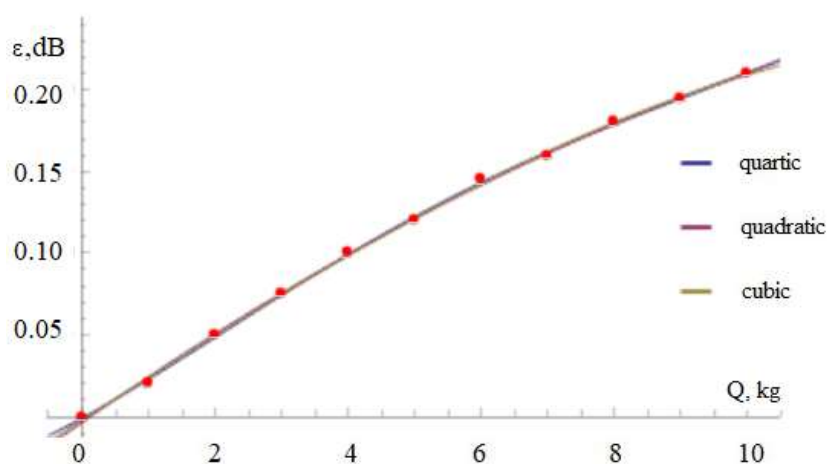


Рисунок 37 – Деформация ОВ при пошаговом увеличении давления

Для статистической обработки полученных экспериментальных результатов была использована программа Wolframalpha (находится в открытом доступе), которая выполняет автоматизированную аппроксимацию и позволяет получить однофакторные математические модели. Деформация ОВ представлена следующими выражениями:

$\varepsilon = 0,000016256Q^4 - 0,000358392Q^3 + 0,00186626Q^2 + 0,0222873Q - 0,00101399$
(аппроксимация quartic);

$\varepsilon = -0,0000378788Q^3 - 0,000136946Q^2 + 0,0262937Q - 0,00216783$
(аппроксимация cubic);

$\varepsilon = -0,000705128Q^2 + 0,0284604Q - 0,00353147$ (аппроксимация quadratic).

Таблица 4 – Результаты оценки качества аппроксимаций

Аппроксимация	AIC	BIC	R ²	Adjusted R ²
quartic	−97,4326	−95,0453	0,99948	0,999134
cubic	−96,5373	−94,9457	0,999098	0,998873
quadratic	−86,288	−94,4394	0,999272	0,99896

На рисунке 38 представлен график зависимости затухания (потери оптической мощности) от приложенного веса. Имеется достаточно высокая линейность характеристик.

Окончательно выбрана кубическая аппроксимация, так как имеет более высокий показатель информационного критерия Акаике, который составил 27,9177, полученный коэффициент детерминации R²=0,9979:

$A = -0,0134033A^3 + 0,0728438A^2 + 3,15734A + 99,9231$ (аппроксимация cubic).

Относительная погрешность измерений составила 2,69 %, коэффициент Стьюдента 1,094 с доверительным интервалом 0,95.

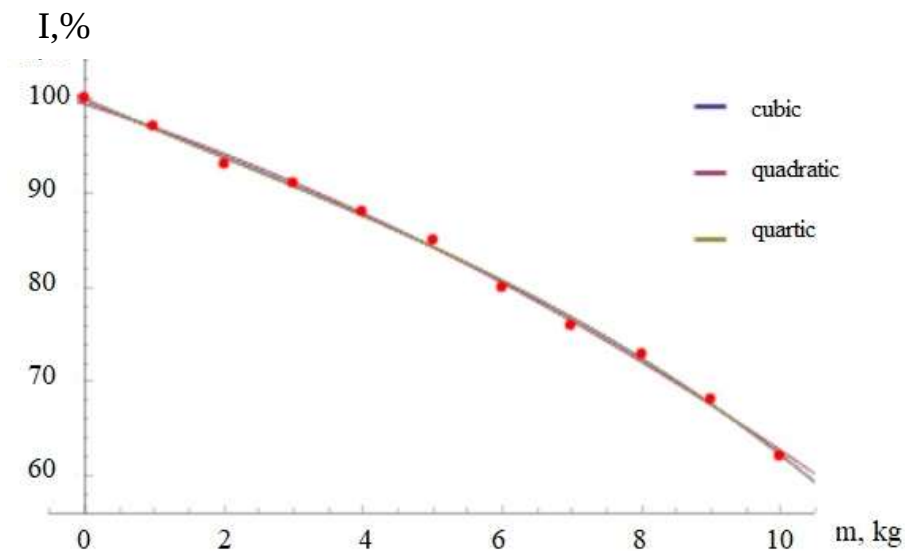


Рисунок 38 - График зависимости затухания световой волны с длиной 1550 нм в зависимости от приложенной нагрузки.

На основе метода контроля свойств оптической волны при прохождении по ОВ, эффект светопрохождения, выполнен контроль дополнительных оптических потерь при микроизгибе ОВ, полученные результаты пригодны для создания ВОД. Полученные данные могут быть использованы при создании методов и средств безопасности передачи данных по ВОЛП, так как при несанкционированном доступе злоумышленники используют устройства, создающие изгиб, что вызывает незначительное увеличение значения дополнительных потерь и затухание сигнала, так как эти два параметра связаны между собой.

Использование метода обратного рассеяния, который реализовывался при помощи оптического рефлектометра типа OTDR, позволит не только установить факт увеличения дополнительных потерь и затухания сигналов при образовании нового изгиба ВОК, но и определить его точное место на всей дистанции. Точность определения будет лежать в пределах 5 метров на 100 км протяженности волоконно-оптического кабеля. При численном моделировании потери оптической мощности учитываются от количества изгибов, градуса угла изгиба и длины волны. Обеспечивается вычисление значений дополнительных потерь в ВОК внутренней прокладки с ОВ стандарта G.652 при количестве изгибов до 21. В процессе исследований установлено, что потери при изгибе ОВ стандарта G.652

зависят не только от количества изгибов, радиуса и значения угла, но и увеличиваются при увеличении длины волны 1250 - 1650 нм, установлено различие в значении сформированных оптических потерь при 1310 и 1550 нм. При отсутствии изгиба увеличение длины световой волны вызывает снижение значения дополнительных потерь оптической мощности. Исследования показали, что имеется рост оптических потерь при микроизгибе ОВ с ростом длины волны, что является ограничением диапазона пропускания одномодовых ОВ. Соответственно, при увеличении числа изгибов потери растут. Разработанная программа действует в граничных условиях длины волны от 1310 до 1625 и максимального числа изгибов не более 7 на каждое значение угла 45, 90 и 135 градусов, которые не изменяются. Установлено, что потери при микроизгибе достигали 0,02 дБ и более, но их значения являются разными для разной длины оптической волны. Программа автоматически выполняет аппроксимацию и строит кривую зависимости потерь от количества и параметров углов изгиба.

Данная методика позволяет контролировать вес на расстоянии до 100 км. Точка измерения может находиться в значительном удалении от блока измерения. Например, можно контролировать вес автотранспорта, проезжающего по мосту или определенному участку дороги. Попутно можно измерить скорость передвижения автомобиля, если расположить датчики на определённом расстоянии друг от друга. Также возможно использование результатов исследования дополнительных потерь для разработки автоматической системы контроля повреждения волоконно-оптического кабеля или охранной системы от несанкционированного доступа к информации.

3.4 Исследование внешних механических воздействий на величину дополнительных потерь в телекоммуникационных волоконно-оптических кабелях в условиях эксплуатации

В данном разделе приведена методика определения зависимости изменения мощности сигнала от количества изгибов кабеля. Были проведены

исследования ВОК, применяемых в системах передачи информации АО «Казахтелеком», для детального изучения процессов, связанных с формированием дополнительных оптических потерь в исследуемом объекте (ВОК). Далее были получены детерминированные модели, которые отражают физику изменения параметров оптической волны и содержат описание механизмов элементарных процессов в них. Результаты многофакторного эксперимента представлены графиками зависимостей [180,181]. Измеряемым оптоволоконным кабелем является достаточно прочный оптоволоконный кабель SNR-УТ-12, предназначенный для прокладки внутрирайонной междомовой сети кабельного провайдера связи или кабельного телевидения. В Приложении 3 представлены результаты измерений и их среднее значение потерь, определенное с помощью оптического рефлектометра. По средней величине потерь построен график зависимости количества изгибов от радиуса изгиба.

Построены кривые зависимости дополнительных потерь от числа изгибов при различных значениях радиусов изгиба оптического волокна. Значение радиуса r кривой приведено для всех трех графиков следующим образом: 1-3 мм, 2-5 мм, 3-10 мм, 4-12 мм, 5-15 мм, 6-18 мм [180,181], рисунки 1-3 3, Приложение 3.

Далее был исследован оптоволоконный кабель М6А24, который предназначен для передачи данных на значительные расстояния и по большому числу каналов. Данный ВОК обладает высокой пропускной способностью и низкими показателями затухания оптического сигнала, а также имеет низкие показатели дисперсии. ВОК выполнен на основе одномодового ОВ с размерами 9/125 мкм сердцевины и оболочки соответственно. Рекомендованная длина волны 1,3...1,55 мкм.

На рисунке 41 приведены результаты измерений и их среднее значение потерь, определенное с помощью оптического рефлектометра. По средней величине потерь построен график зависимости количества изгибов от радиуса изгиба [180,181]. Далее был исследован волокно-оптический кабель ОКЛСМ-12-

FF, предназначенный для прокладки в кабельных каналах, трубах, блоках, коллекторах. На рисунке 42 представлены результаты измерений и их среднее значение потерь. По средней величине потерь построен график зависимости количества изгибов от радиуса изгиба [180,181]. Исследованные кабели в нормальных условиях эксплуатации показали, что не все технические характеристики производителей соответствуют заявленным. Дополнительные потери, возникающие от механического воздействия на них, могут быть выше нормативных, даже если изготовитель указывает, что кабель не подвержен механическим изгибам и деформациям.

На основании исследования даны рекомендации по выбору оптоволоконного кабеля для использования в АО «Казахтелеком». В ходе эксперимента установлен ряд зависимостей увеличения дополнительных потерь при увеличении числа изгибов волокна и уменьшении радиуса изгиба, а также при увеличении длины волны оптического диапазона источника света. Данная информация является новой, и подобных исследований не проводилось. Полученные результаты позволят вносить поправки на более точные результаты отчетов (записей) телекоммуникационных устройств, направляемых на центральный сервер в системе мониторинга для оценки общей качественной ситуации. В случае увеличения дополнительных потерь информация направляется на пульт оператора для принятия соответствующих решений. В ходе работ были отмечены завышенные потери при несоблюдении технологии монтажа и правил эксплуатации. Даны рекомендации, которые были направлены руководству данной телекоммуникационной компании для устранения замечаний. Создана база данных, которая будет размещена на сервере в системе мониторинга для оценки качества телекоммуникационной сети. Данное исследование проводилось с участием преподавателей, магистрантов и представителей технической службы АО «Казахтелеком».

3.5 Исследование внешних механических воздействий на величину обратного рассеяния для контроля роста дополнительных потерь при несанкционированном доступе к ВОЛП

Излучение от источника вводится и выводится на одном конце волокна при использовании метода обратного рассеяния, а также можно получить сведения о процессах затухания вдоль световода. Данный метод основан на Рэлеевском рассеянии [1-5]. Оптический рефлектометр посылает световой импульс длиной волны от 900 до 1625 нм по ОВ, часть импульса отражается обратно от различного рода неоднородностей в ОВ, например, трещин, сварных соединений, примесей и др. При этом импульс световой волны рассеивается во всех направлениях одновременно и только около 0,0001% возвращается назад к фотоприемнику, это явление называется обратным Рэлеевским рассеянием [161]. Рэлеевское рассеяние имеет потери при длине оптической волны, равной 1550 нм затухание составляет от 0,2 до 0,3 дБ на км, если использовать длину оптической волны, равной 850 нм, то затухание будет примерно 4,0 - 6,0 дБ на км. Данная мощность, после того как проходит назад по ОВ, будет постепенно затухать. Выводится и измеряется остаток мощности с помощью направленного ответвителя, который располагается перед световодом. Согласно этой мощности и времени прохождения по световоду строится график, на котором отражается затухание по всей длине ОВ. Схема оптического рефлектометра представлена на рисунке 39 [1-5].

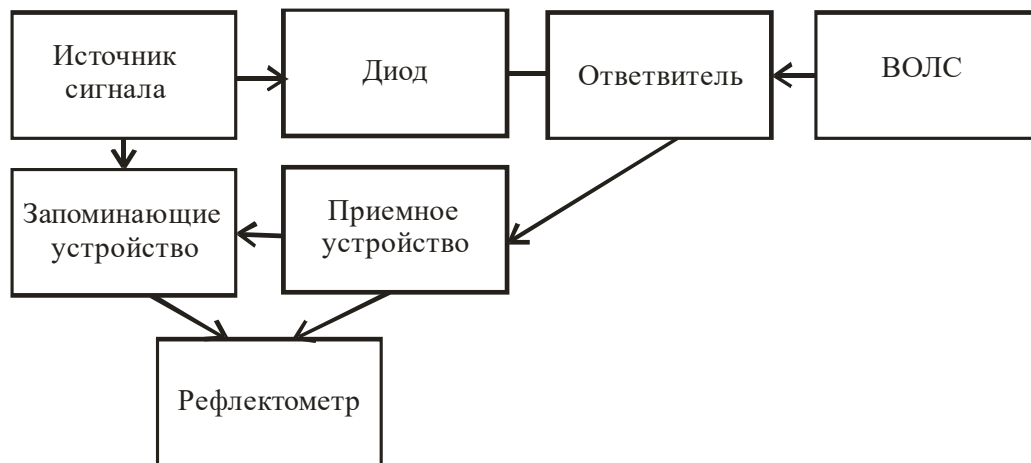


Рисунок 39 – Метод обратного Рэлеевского рассеяния

Проведены эксперименты по контролю и измерению дополнительных потерь с использованием оптического рефлектометра, который широко используется в системах телекоммуникации для обнаружения точного места повреждения ВОЛП. Данный прибор можно использовать для измерения дополнительных потерь в ОВ, разъёмных и сварных соединениях, которые выполнены при монтаже или ремонте ВОЛП. С использованием оптического рефлектометра, который предназначен для измерения параметров ОВ, характеристик затухания оптического сигнала и поиска места его повреждения, можно обнаруживать постепенное или внезапное ухудшение качества ОВ. Это делается за счет сравнения полученных характеристик при измерении и уже полученных ранее при проведении тестирования. Ранее уже проводились эксперименты с источником излучения и ваттметром, при помощи которых контролировалось затухание в ОВ и уровень дополнительных потерь. Световой сигнал подавался заданного уровня на один конец ОВ и измерялся его уровень на другом конце ОВ, после определялась разница между уровнями в децибелах (дБ), что отражает полное затухание. В данном методе есть один недостаток, так как нельзя определить, что затухание имеет равномерное по силе распределение по всей длине ОВ, а может затухание локализовано в одной точке (месте). Для ликвидации этого недостатка были проведены эксперименты с использованием

оптического рефлектометра для определения проблемного места ОВ, где был сформирован участок с наибольшим значением дополнительных потерь, которые возникли при микроизгибе, а это происходит при механическом воздействии на ВОК или в случае НД. С другой стороны, при работе с оптическим рефлектометром получается график «уровень сигнала в зависимости от расстояния», крайне полезный при определении места возникновения в волокне каких-либо неполадок. Эксперименты по измерению уровня дополнительных потерь и поиску участка с микроизгибом были проведены для длины волны $\lambda_1 = 1310$ нм, когда на ОВ не оказывалось силовое воздействие (без микроизгиба), можно сказать без какого-либо вмешательства в ВОЛП, рисунок 40. Рассматривая рефлектограмму, можно сделать вывод, что потери составляют 1,830 дБ и на рефлектограмме нет признаков формирования микроизгиба [161]. Проведенные исследования доказали, что использование одного метода контроля светопропускания ОВ будет недостаточно. Даже если зафиксировать увеличение потерь в случае несанкционированного доступа к ВОЛП, нет возможности определить точное место подключения. При помощи оптического рефлектометра можно точно установить расстояние до места падения оптического сигнала.

Остальные рефлектограммы представлены в Приложении И

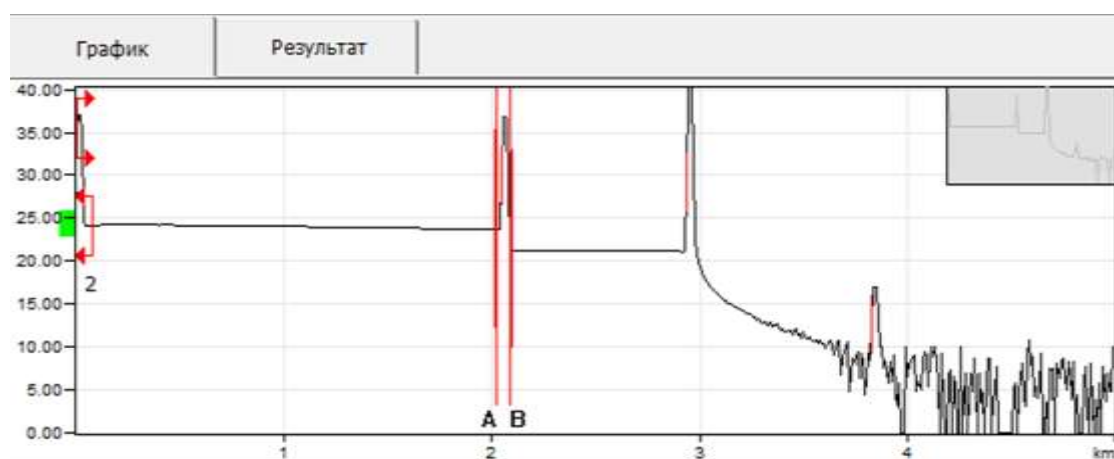


Рисунок 40 – Рефлектограмма на длину волны $\lambda_1 = 1310$ нм

Дальнейший детальный анализ рефлектограмм позволяет точно идентифицировать безразрывный несанкционированный доступ к ВОЛП с

принудительным отводом мощности. На рисунке 41 показана характерная особенность появления признаков НД.

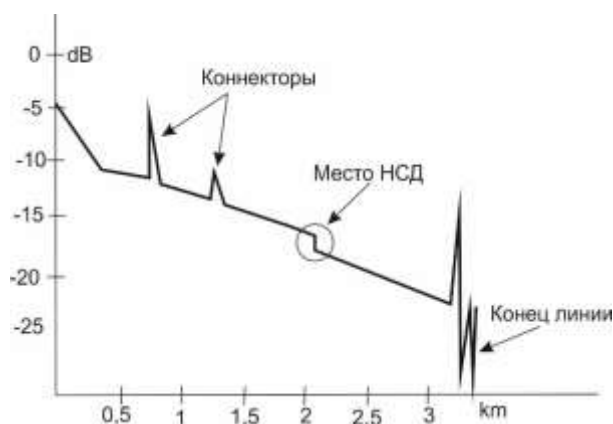


Рисунок 41 - Поиск подключения на оптической трассе с помощью оптического рефлектометра

Эксперименты показали, что использование метода обратного рассеивания позволяет контролировать рост дополнительных потерь при НД, а также имеется возможность определения места подключения к ВОЛП. Полученные результаты практических экспериментов установлена зависимость роста дополнительных потерь оптической мощности в ОВ при росте длины волны. Для контроля НД эффективнее будет контролировать НД на волне 1625 нм, в этом случае не будет помех для системы передачи информации. Проведены эксперименты по идентификации безразрывного НД к ВОЛП с принудительным отводом мощности как в виде симуляции, так и в виде физического эксперимента, при подключении к линии методом «микроизгиба». Можно отметить, что НД создает опасность утечки информации из ВОЛП, а также создает искажения и помехи. Использование оптического рефлектометра для измерения обратного рассеивания позволяет контролировать увеличение потерь при НД, а также точно установить место подключения к ВОЛП.

3.6 Исследование лабораторного образца системы контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности

В экспериментах был использован источник оптического излучения с длиной волны $650 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$, мощностью около 30 мВт. При проведении эксперимента выполнялся контроль дополнительных оптических потерь. Установлены некоторые факты, например, связанные с контролем технического состояния оптических кабелей и обнаружения несанкционированного доступа к информации по дополнительным потерям оптической мощности. Более подробную информацию о ранее проведенных экспериментах, связанных с исследованием лабораторного образца АПКТК можно найти в [187-189]. Лабораторный образец АПКТК позволил провести ряд важных экспериментов, которые связаны с отработкой реакции АПКТК на ВСВ на ВОК. Схема лабораторного образца АПКТК показана на рисунке 42. Данный образец был специально сконструирован и создан для проведения экспериментов, при которых устанавливались факты несанкционированного доступа или повреждения оболочки ВОК [187-189].

Стенд имеет в своей конструкции основание 5, выполненное из фанеры толщиной 12 мм. На основании была установлена катушка 4, на которую был намотан ВОК длиной около 200 метров. Марка используемого в экспериментах ВОК - Shijia Optical Cable GYFJH-2B1.3 IEC60332-3-24 cat.c 2010/09/16N 01839 M. ВОК изготовлен с использованием одномодового ОВ стандарта G-652. Воздействие оказывалось на петлю 3, которая располагалась на основании. Петля была сформирована намерено из нескольких витков ВОК и играла роль ВОД, на который производилось воздействие. Воздействия имитировали случаи НД [187-189].

АПКТК может контролировать техническое состояние ВОК и сигнализировать о его повреждении или обрыве, а также имеет программные настройки, которые могли различить случай НД, например, при воздействии или контакте злоумышленника с ВОК, например, когда он трогает ВОК руками и предпринимает попытку снять верхнюю защитную оболочку для доступа к ОВ.

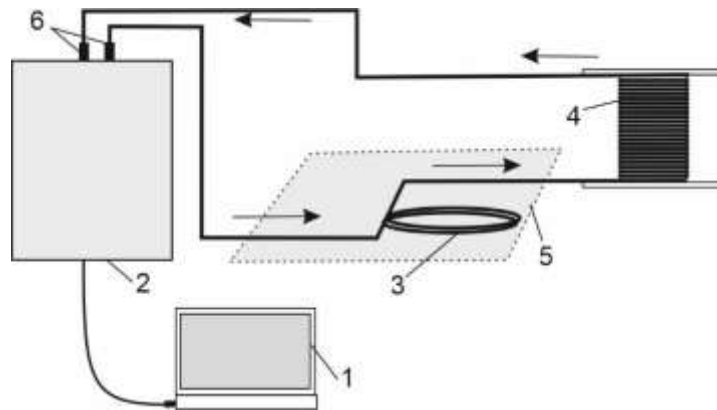


Рисунок 42 - Схема стенда

1 - компьютер с установленным программным обеспечением; 2 – блок обработки данных и генерации импульсов 3 – ВОД; 4 – катушка с ВОК; 5 – основание для крепления катушки; 6 – волоконно-оптический коннектор.

Источник лазерного излучения красного цвета работал в непрерывном режиме. Данная длина волны не оказывает негативного влияния на процесс передачи информации по ВОЛП, так как ВОЛП функционирует на длине оптической волны 1310 нм или 1550 нм. Оптическая волна проходила от источника излучения, установленного в блоке обработки данных и генерации импульсов 2, и возвращалась к нему. При этом оптическая волна двигалась по всей длине ВОК, а именно через катушку 4 и петлю 3, затем возвращалась к блоку обработки данных. В блоке установлена фотоматрица, которая фиксировала все изменения интенсивности оптической волны. При силовом воздействии на ВОК параметры оптической волны изменялись, что фиксировалось фотоматрицей. Конструкция блока обработки данных имела два входа и два выхода и работала в двухканальном режиме для дублирования работы ВОД, а также исключения ошибок срабатывания. Блок обработки данных имел два независимых друг от друга контрольно-измерительных оптических канала. Фотография стенда представлена на рисунке 43 [187-189].

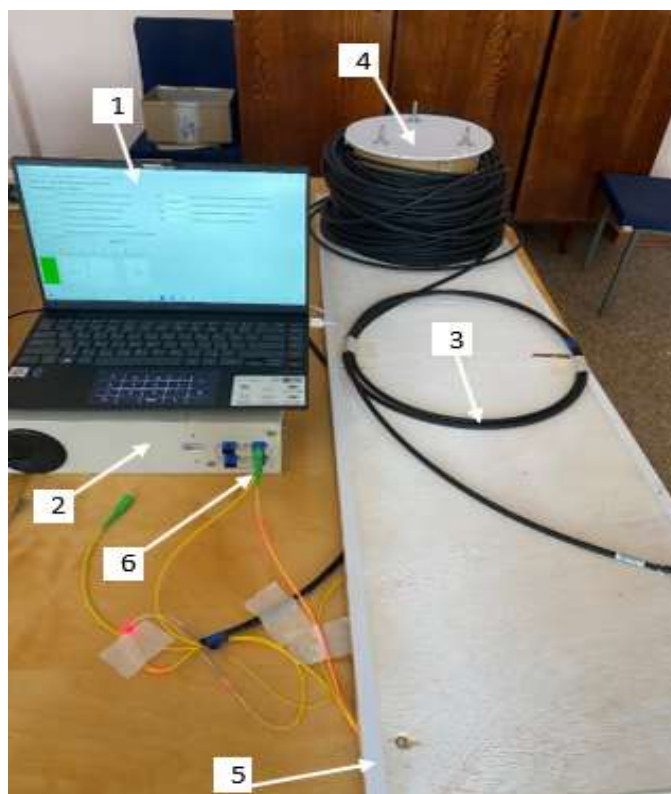


Рисунок 43 - Внешний вид опытного образца

1 - компьютер с установленным программным обеспечением; 2 – блок обработки данных и генерации импульсов 3 – ВОД; 4 – катушка с ВОК; 5 – основание для крепления катушки; 6 – волоконно-оптический коннектор.

Для коммутации ВОК были использованы оптические адаптеры и коннекторы типа SC с ферулой 2.5 мм. Измеренные потери оптической мощности у каждого разъёмного соединения не превышали предела 0,3 дБ. Для надежного контроля технического состояния кабелей и фиксации НД необходимо было выполнить настройку АПКТК. АПКТК выполнял обработку приходящих данных от ВОД, и при воздействии на ВОК выдавался предупреждающий сигнал тревоги, то же было при имитации повреждения ВОК. АПКТК реализован на основании компилируемых статистически типизированных языков программирования. Для его разработки были использованы версия языка программирования Python и элементы библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [187-189]. Контрольно-измерительные оптические каналы имели различные варианты настройки, например, были настроены полностью идентично или имели

незначительное отличие в настройках. На рисунке 44 представлен интерфейс АПКТК в двухканальном варианте работы с двумя ВОД [187-189].



Рисунок 44 - Интерфейс АПКТК

В результате обработки данных эксперимента по воздействию на ВОК и установления факторов этого воздействия построена диаграмма (рисунок 45). Было реализовано 100 различных воздействий рукой на петлю из витков ВОК, в 80 случаях АПКТК сработал при имитации различного по силе воздействия на ВОК.

Все воздействия имели случайный характер по уровню приложенной силы и количеству воздействий, были даже слабые касания оболочки ВОК, когда не было ее деформации в определенную единицу времени [187-189].

Результаты испытания образца АСК доказали его работоспособность и подтвердили достаточно высокую надежность срабатывания для квази-распределённого ВОД при воздействии на одну из четырех зон 1-4 и точность определения зоны повреждения ВОК (рисунок 46). Показатели вероятности срабатывания составили 0,87 при воздействии на ВОК. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 13%. В дальнейшем планируется довести вероятность срабатывания до 0,9 при воздействии на ВОК, при этом планируется достичь снижения вероятности ложного срабатывания до 0,1.

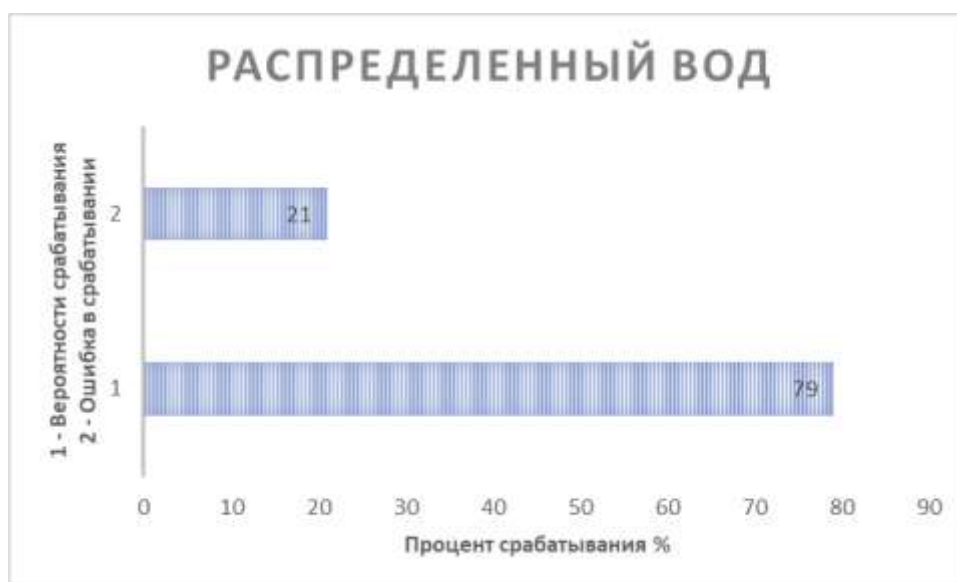


Рисунок 45 - Оценка вероятности для распределённого ВОД

Испытания образца АСК показали достаточно высокую надежность срабатывания распределённого ВОД, который способен определить расстояние до места разрушения и формирование трещины с точностью до 1 м. Значение вероятности срабатывания составило 0,79 при воздействии на ВОК. Ошибка в срабатывании составляет в пределах 21%. Планируется, что в дальнейшем может быть улучшена работа АСК и доработаны алгоритмы его функционирования, что позволит повысить показатели вероятности срабатывания до 0,9, а показатель вероятности ложного срабатывания будет снижен до 0,1.

Результаты экспериментов показали, что есть проблема, связанная с шумом самого источника излучения. Шумы фиксируются фотоматрицей и соответственно для их снижения необходимо уменьшить пульсацию источника излучения. Предложенная методика обеспечивает контроль технического состояния ВОК по дополнительным потерям и может фиксировать механическое воздействие ВОК. Контроль ведется по изменению уровня интенсивности оптической волны видимого диапазона, которая падает на поверхность чувствительного фотоприемника.

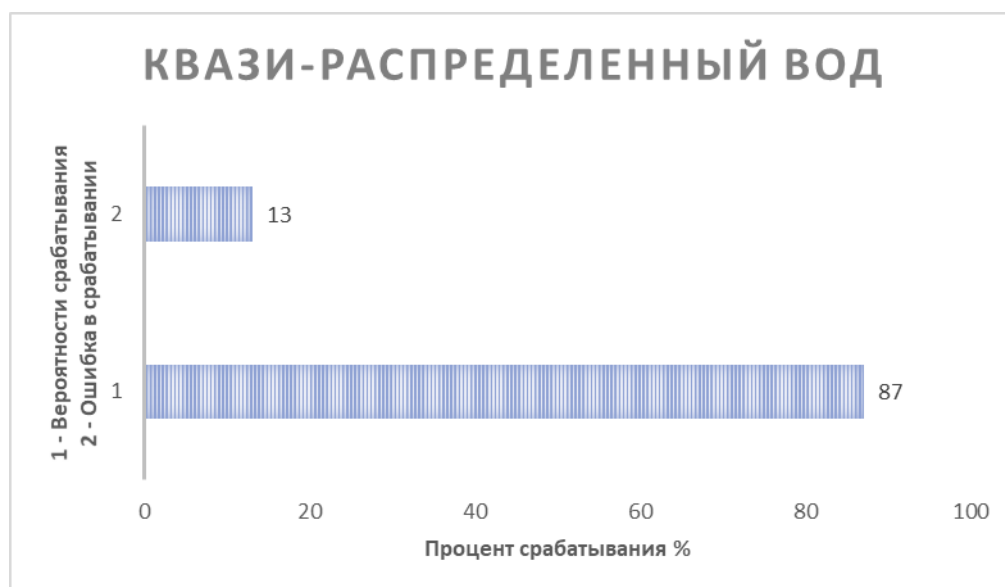


Рисунок 46 - Оценка вероятности для квази-распределённого ВОД

Далее выполняется оптико-цифровой анализ при помощи интеллектуальной программной обработки полученного изображения светового пятна. АПК отслеживает все изменения интенсивности светового пятна и отдельных пикселей в каждом секторе.

На рисунке 47 показаны графики фиксации воздействий на ВОК при попытке осуществить НД. Описание графиков и изменения характеристик светового пятна при механическом воздействии на ОВ (ВОК) можно найти в источниках [187-189]. Основным является то, что АПКТК реагирует на воздействие и способен контролировать ВОК по дополнительным потерям. Контрольно-измерительный оптический канал с меньшей чувствительностью меньше подвержен влиянию помех.

Исследования лабораторного образца АПКТК с контролем дополнительных оптических потерь мощности показали хороший результат и достаточную эффективность срабатывания при воздействии на ВОК.

Аппаратная часть является достаточно простой по своей конструкции и использует относительно недорогие комплектующие детали, что формирует доступную стоимость АПКТК для потребителей и создает перспективу его промышленного использования.

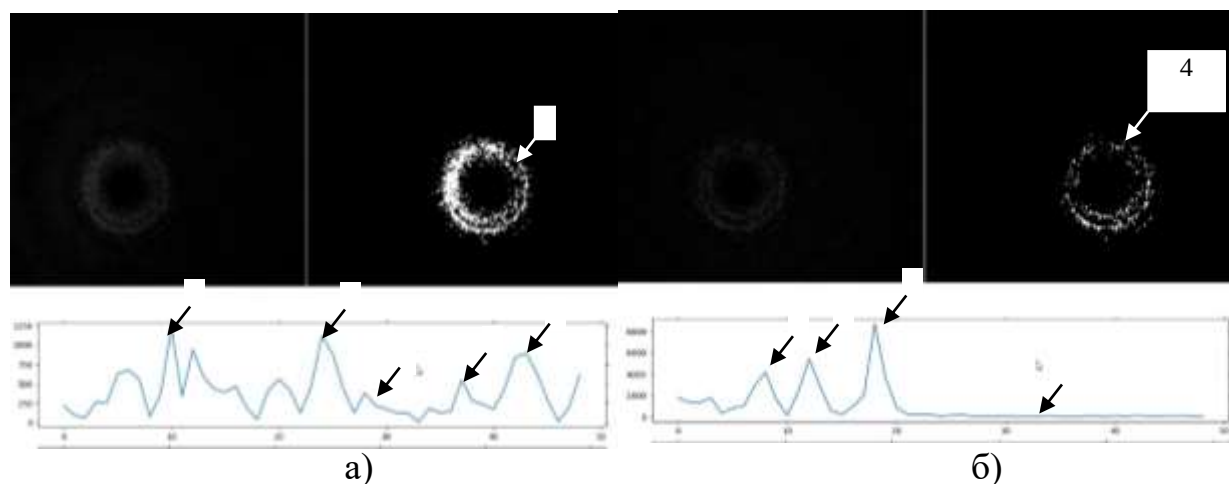


Рисунок 47 - Графики фиксации воздействий на ВОК при попытке осуществить НД

а) контрольно-измерительный оптический канал с большей чувствительностью; б) контрольно-измерительный оптический канал с меньшей чувствительностью;
 1 – всплески увеличения дополнительных потерь, приведшие к увеличению количества белых пикселей при воздействии на ВОК; 2 – отсутствие воздействия на ВОК; 3 – сформировавшиеся помехи после воздействия на ВОК; 4 – форма светового пятна при воздействии на ВОК.

Сведения о различных вариантах АПКТК и их практической апробации можно найти в Приложении К.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. При проведении исследований использовались лазеры с различной длиной волны 650, 850, 1310, 1550 нм (видимого и инфракрасного диапазона). Лазер работал в непрерывном режиме, от лазера до фотоприемника пропусклся луч, который достигал фотоприемника. Далее выполнялось преобразование оптического сигнала в электрический, а далее уже производился оптико-цифровой анализ параметров ПС, сформированного на поверхности фотоприемника, установленного на выходе из ВОД. Если ОВ подвергается микроизгибу, то проходящая по его сердцевине оптическая волна меняет свои

свойства, а именно увеличиваются дополнительные потери, снижается интенсивность и изменяется фаза распространения.

2. В процессе моделирования и проведения натурных экспериментов установлено, что сформированное на поверхности фотоматрицы ПС по своей форме имеет общие признаки с известным пятном Пуассона и подчиняется нормальному закону распределения Гаусса. Данное пятно имеет более яркую сердцевину (с большей интенсивностью), и более темную оболочку (с меньшей интенсивностью), а также присутствует граница раздела между оболочкой и сердцевиной. Фотоматрица способна контролировать все изменения интенсивности светового пятна, при любом механическом воздействии на ОВ, включая микроизгиб. Методика основана на контроле дополнительных потерь, которые сформированы в случае изгиба или микроизгиба, когда часть излучения покидает сердцевину ОВ и попадает в оболочку, что фиксируется фотоматрицей, а после проводится оптико-цифровой анализ с выдачей численного значения силы воздействия.

3. Результаты экспериментов показали, что оптический рефлектометр позволяет более точно установить место повреждения ВОК, при этом разрешающая способность данного прибора, работающего в совокупности с АПКТК, достигает значения в 1 метр при протяженности измерительного канала до 30 км, в перспективе развития АПКТК - достичь разрешающей способности в уровень 0,1 метра при дистанции до 100 км, что не входит в противоречие с техническими возможностями оптического рефлектометра, который подключен к распределенному ВОД. Проведенные исследования доказали, что использование одного метода контроля светопропускания ОВ будет недостаточно, при фиксации роста потерь, когда возможно осуществляется несанкционированный доступ к ВОЛП, но данный метод не обеспечит возможности точно определить место подключения к ВОЛП.

4. АПКТК способен работать с квазираспределенными ВОД, что не позволяет точно установить место повреждения ВОК, а только указать грубо зону вероятного повреждения с разрешающей способностью от 50 до 500 метров.

5. Температура в помещении лабораторий при проведении экспериментов практически не менялась и колебалась в пределах 1-2 °С, что не повлияло на работу контрольно-измерительных приборов и АПКТК. АПКТК показал хорошую устойчивость в работе и стабильность в выдаче результатов измерения. Для оценки влияния внешней температуры на ВОД и АПКТК был выполнен нагрев ВОД до температуры 60 °С, но повышение температуры не вызвало нарушения работы АПКТК, так как он имеет функцию корректировки «нуля» при повышении температуры ВОД.

6. Эксперименты показали, что использование метода обратного рассеивания позволяет контролировать рост дополнительных потерь при НД, а также имеется возможность определения места подключения к ВОЛП.

4 АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ ПО ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОТЕРЯМ

4.1 Разработка аппаратно-программной части комплекса контроля технического состояния оптических кабелей

Данная глава рассматривает вопросы, касающиеся разработки АПКТК по дополнительным потерям оптической мощности. АПКТК является частью системы контроля (СК), к которому подключаются ВОД. В качестве ВОД используется ВОК, тем самым образуется единая СК, которая может контролировать техническое состояние ВОК в режиме реального времени в течение 24 часов в полностью автоматическом режиме. СК работает круглосуточно, а все полученные данные могут храниться на жёстком диске компьютера или сервера и быть востребованы при необходимости. АПКТК способен не только осуществлять непрерывный контроль технического ВОК, но и отслеживать НД. По данной диссертации имеются публикации статей [179-189] и [194-218], где раскрывается сущность предлагаемой методики, принципа работы ВОД и представлены результаты исследования различных ВОД. Имеются также охранные документы, в которых излагается суть технического решения и представлено описание принципа работы ВОД. Информацию о АПК и ВОД можно найти в патентах [49-58]. По теме диссертации опубликованы статьи, в которых представлены результаты исследований АПК и ВОД [5, 21,22,59] и [141,142, 159-169]. В указанных статьях можно найти подробную информации для понимания основных преимуществ квазираспределенных и распределённых ВОД и многие другие сведения, что касается их работы. Предлагаемая методика контроля подразумевает, что ВОД находится внутри объекта, который контролируется. У предлагаемого АПКТК есть перспектива использования в других областях науки и техники, например, для контроля давления или смещения горных пород. Также предлагаемый АПКТК может быть

использован для контроля целостности железобетонных фундаментов или других строительных конструкций. Для этого АПКТК оснащается не только измерительной частью, но и сигнализацией, которая контролирует целостность оболочки ВОК и защищает его от НД. Использование АПКТК позволяет осуществлять дефектоскопию и раннюю диагностику технического состояния внутризоновых (местных) ВОК на новый уровень развития. В настоящий момент времени у инженеров достаточно ограниченные возможности для проведения контроля технического состояния ВОК и другого телекоммуникационного волоконно-оптического оборудования при помощи распределенных или квазираспределенных датчиков, работающих в режиме реального времени. В настоящий момент контроль технического состояния ВОК проводится в большей мере с использованием ручных или переносных средств рефлектометрии и др. Человеческий фактор может в определенной мере влиять на качество проведенного контроля за техническим состоянием ВОК, так как возможны ошибки и упущения, в некоторых случаях возможны даже аварийные ситуации. Возможны случаи, когда ВОК не удастся осмотреть. Сейчас имеются средства измерения, диагностики и контроля, которые имеют различное качество и точность, а также требует специальных навыков работы с ними. Недопущение НД является важной задачей повышения качества предоставления услуг, а контроль сохранности ВОК позволит избежать существенных финансовых затрат. АПКТК позволит оперативно реагировать на повреждение направляющей системы (ВОК) и выдавать точные координаты обрыва ВОК, что сократит время устранения аварии и повысит качество предоставления услуг телекоммуникации. Частично проблему НД и контроля целостности ВОК можно решить за счёт внедрения АПКТК с интеллектуальным оптико-цифровым блоком обработки данных подключенным к распределённым и квазираспределенным ВОД. При этом ВОД нет необходимости изготавливать отдельно, его роль выполняет ВОК. Также для работы с АПКТК не требуется высокого уровня квалификации специалистов, так как это полностью интеллектуальная автоматическая система, способная обучаться и не требующая

постоянного обслуживания или настройки. В настоящий момент внутризональные и местные (внутриобъектные) ВОК контролируются в большей мере человеком с определённой периодичностью, соответственно в процессе контроля могут быть допущены ошибки из-за наличия человеческого фактора. Отсутствие доступных по стоимости и простых по конструкции СК не позволяет телекоммуникационным компаниям обеспечить защиту от НД и своевременно реагировать на повреждение ВОЛП, а также обеспечить контроль дополнительных потерь в режиме реального времени. АПКТК подключается к распределённым и квази-распределённым ВОД, это позволяет обеспечить непрерывность контроля на протяжении всей ВОЛП и одновременно контролировать несколько ВОК, а также является средством ранней диагностики повреждения ВОЛП. АПКТК позволяет на раннем этапе контролировать аварийно-опасные зоны повреждения ВОЛП, что позволит специалистам принять своевременные меры для недопущения аварии.

Сам процесс разработки АПКТК и ВОД, а также самой СК занял длительное время и растянулся на несколько лет. В данной главе будут рассмотрены несколько вариантов АПКТК и ВОД, которые создавались в разное время и были предназначены для различных областей промышленности, в частности горнодобывающей. Несмотря на широту возможности использования АПКТК и ВОД для измерения различных параметров, общие принципы работы остаются неизменными. АПКТК и ВОД способны контролировать смещение и давление горных пород, деформации строительных конструкций и ВОК, так как основным чувствительным элементом остается ОВ и по нему проходит оптическая волна. Автор данной диссертации опубликованы статьи, которые посвящены разработке ВОД для контроля деформации, смещения, нагрузки и давления [194 - 204]. Это своеобразный процесс развития и становления новой технологии интеллектуального оптико-цифрового анализа дополнительных сформированных в ОВ (ВОК) при механическом воздействии, вызвавшем микроизгиб ОВ [194 - 204]. Также длительным был процесс создания точечных,

распределённых и квази-распределённых ВОД. Первоначальные варианты АПКТК и ВОД прошли практическую апробацию и серию лабораторных испытаний, далее следовал процесс усовершенствования и модернизации, а также осуществлялся переход на новые методы обработки данных [194 - 205] (Приложение К). АПКТК строился на разных методах обработки данных, начиная от анализа формы светового пятна и изменения его интенсивности по разбитым секторам окружности до оптико-цифрового интеллектуального анализа дополнительных потерь и ПС, сформированного на поверхности фотоматрицы. Имеются патенты [49-58], в которых отражена техническая новизна и суть предлагаемых решений по различным вариантам АПКТК (ВОД). Автор диссертационной работы выступал на научных конференциях с очным докладом для апробации результатов исследования [206-217]. Указанные выше публикации содержат множество информации для понимания принципа работы предлагаемого АПКТК и ВОД как последней, так и первоначальной версии. В публикациях [194 – 217] отражен ряд важных вопросов, которые касаются основных принципов функционирования, настроек и возможностей АПКТК и ВОД. Научная работа была разбита на несколько этапов совершенствования АПКТК и ВОД и поиска новых технических решений направленных на улучшение их качеств, а самое важное, снижение стоимости и повышение надежности работы. В процессе подготовки данной диссертационной работы выдвигалось несколько гипотез, которые были проверены на практике, какие-то гипотезы не подтвердились, но некоторые прошли проверку и стали основой АПКТК и ВОД. Первоначальные варианты АПКТК и ВОД были рассмотрены в публикациях [160-166, 179-189], поэтому исключать их из рассмотрения не имеет смысла, так как они послужили прототипом и основой последней версии АПКТК с распределённым и квази-распределённым ВОД, которые уже использовались для контроля технического состояния оптических кабелей [187-189]. АПКТК основан на интеллектуальном оптико-цифровом анализе изменения параметров световой волны, формирующей световое пятно, которое падает на поверхность фотоприемника высокого разрешения и может

контролировать определенную зону по своей протяженности (или участок), при этом протяженность контролируемой зоны может быть от нескольких сотен метров до десятков километров. Рассмотренный далее усовершенствованный и модернизированный вариант АПКТК отличается от первоначальной версии тем, что основан на другом принципе обработки данных, на основе оптико-цифрового анализа изменения картины пикселей светового пятна, которое сформировано квазираспределенными ВОД и наличием второго модуля, который предназначен для работы с распределенным ВОД. Для работы второго модуля используется метод оптической рефлектометрии. Все варианты разработанных АПКТК будут рассмотрены далее, но первым для изучения будет представлен последний вариант, который является двухмодульным.

Последний вариант АПКТК отличается от своих ранних аналогов, что может работать одновременно с двумя разными типами ВОД - распределенным и квазираспределенным. Более ранние версии АПКТК были способны работать только с квазираспределенным, также имеется разница в методах обработки данных. Последний АПКТК вариант для различия в обозначении имеет индекс (КР), соответственно АПКТК^{КР}, а более ранние версии, из которых было создано две версии, будут обозначены (К1) и (К2), соответственно АПКТК^{К1} и АПКТК^{К2} (Приложение К). Они были рассмотрены в статьях в различные годы, например [163,185,187, 203 и др.] (Приложение К).

Вначале будет рассмотрен последний вариант АПКТК^{КР}, которому присвоен индекс (КР), его интерфейс представлен на рисунке 48. АПКТК^{КР} разделен на два независимых модуля, каждый из которых работает со своим видом ВОД. Первый модуль подключается к четырем квази-распределенным ВОД, а второй модуль к одному распределенному ВОД. Первый модуль работает на четырех участках длина которых определяется исходя из условий эксплуатации, а второй модуль способен работать с распределенным ВОД протяженность которого равна протяженности всех четырех участков. Одной из функций второго модуля входит резервирование контролируемых участков и точное определение места повреждения с разрешающей способностью 1 метр.

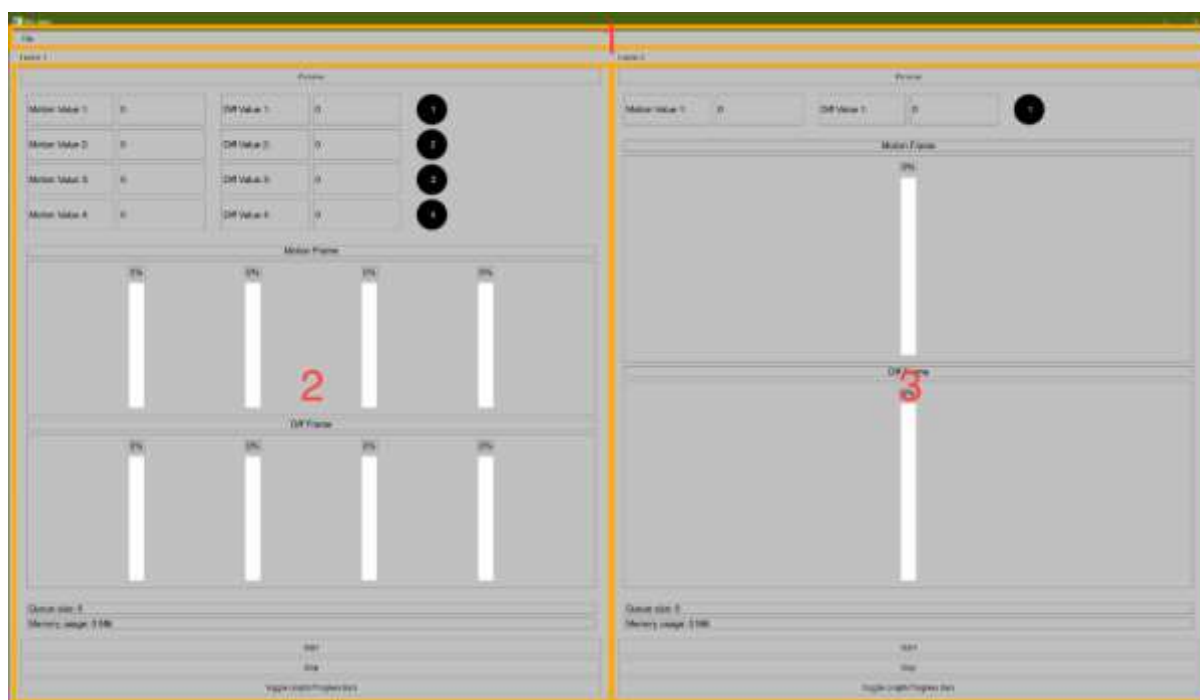


Рисунок 48 – Окно АПК №1

1 -блок 1; 2 – блок 2; 3- граница разделов блоков АПК

Первый модуль АПКТК^{КР} работает одновременно с четырьмя независимыми контрольно-измерительными каналами, и к нему присоединяется четыре квазираспределенных ВОД. Их разрешающая способность может изменяться в зависимости от длины участка и лежать в пределах от нескольких сотен метров до десятков километров. Квазираспределенный ВОД не способен точно определить место повреждения или точки подключения при НД, но он контролирует техническое состояние ВОК по дополнительным потерям. Если возникает ситуация, что первый модуль фиксирует повреждение ВОК или попытку НД, то оператору или ответственному за эксплуатацию лицам приходит сообщение на мобильное устройство, также информация выводится на экран компьютера (монитор). Второй модуль включается автоматически, так как он тоже фиксирует изменение рефлектограммы и проводит точное измерение до точки, в которой сформировалась неоднородность (микроизгиб). В данной работе лабораторный и опытный образец имеют всего четыре канала, этого, конечно, недостаточно для контроля телекоммуникационной сети населенного пункта или предприятия, но любая версия АПКТК имеет возможность

расширения возможностей для контроля, количество каналов может быть увеличено до 32, это для одного блока обработки данных. Если количество каналов нужно больше, то необходимо использовать несколько одновременно работающих микропроцессоров, тогда количество каналов можно увеличить до 64, этот предел объясняется ограниченностью оптического разветвителя, который разделяет луч на равные доли, и мощностью лазера. Если есть необходимость еще увеличить количество каналов до нескольких сотен, то необходимо уже значительно расширять аппаратную часть и увеличивать количество одновременно работающих микропроцессорных блоков обработки данных и источников излучения. Теоретическая протяженность квазираспределённого ВОД составляет около 100-120 км, на практике максимальная дальность обнаружения составила около 40 км, при доработке аппаратно-программной части возможно достижение значения в 60 км. Второй модуль содержит только один контрольно-измерительный канал, и к нему подключается только один распределенный ВОД, при использовании второго модуля для контроля нескольких распределенных ВОД необходимо применять автоматический оптический коммутатор, у которого имеется от 16 до 64 независимых оптических портов. Оптический коммутатор может автоматически переключать рефлектометр на каждый канал через заданный промежуток времени, а АПКТК^{КР} будет фиксировать все параметры и их изменения, но для этого требуется доработка аппаратно-программной части, так как требуется управление оптическим коммутатором. Предлагаемый вариант АПКТК^{КР} достаточно экономически выгоден, по сравнению с магистральными СК, так как у них один стационарный рефлектометр подключается только к одному магистральному ВОК. Вариант, когда используется один рефлектометр, который по очереди подключается к каждому распределенному ВОД на короткий срок, будет технически и экономически выгодным, так как стационарный оптический рефлектометр, особенно стационарный, для контроля магистральных ВОК имеет высокую стоимость и применение его во внутризонах сетях будет не рациональным. Предлагаемый АПКТК^{КР} работает с переносным компактным

вариантом оптического рефлектометра с сетевым управлением (Yokogawa серии AQ1200). Также возможно использование менее дорогостоящего аналога, например, можно использовать оптический рефлектометр от компании Joinwit, произведённый в Китае. Теоретическая протяженность распределенного ВОД составляет 500 км, его стабильная работа возможна на дистанции 100-120 км, на практике проведены испытания при протяженности, распределённого ВОД до 40 км, достигнута определенная стабильность работы второго модуля. Благодаря использованию второго модуля возможно определять место повреждения с точностью до 1 метра при протяженности, распределенного ВОД, равной 40 км. Во всех случаях АПКТК^{KP} работает с ВОД, которые находятся внутри ВОК. Основной контроль по участкам производит модуль 1, это основная контрольно-измерительная часть АПКТК^{KP}, контролирующая техническое состояние ВОК, а модуль 2 является дублирующим и по большей мере используется для точного определения места повреждения ВОК с точностью до 1 метра, поэтому достаточно использовать один распределенный ВОД.

Модули 1 и 2 имеют собственное меню для настройки и управления его работой. АПКТК^{KP} работает в режиме реального времени, в круглосуточном режиме, а полученные данные хранятся на жёстком диске компьютера или сервера и при необходимости могут быть востребованы администратором. Хранению подлежат все данные, связанные со срабатыванием сигнализации, которая осуществляет защиту ВОК от НД. Сигнализация является важной частью АПКТК^{KP} и содержится в обоих модулях, она реагирует на резкое изменение контролируемых параметров во времени и скорости роста их производной, а также изменения интегральной площади. На рисунке 49 показана контрольно-измерительная часть первого модуля, который имеет разделение на четыре независимых контрольно-измерительных канала.

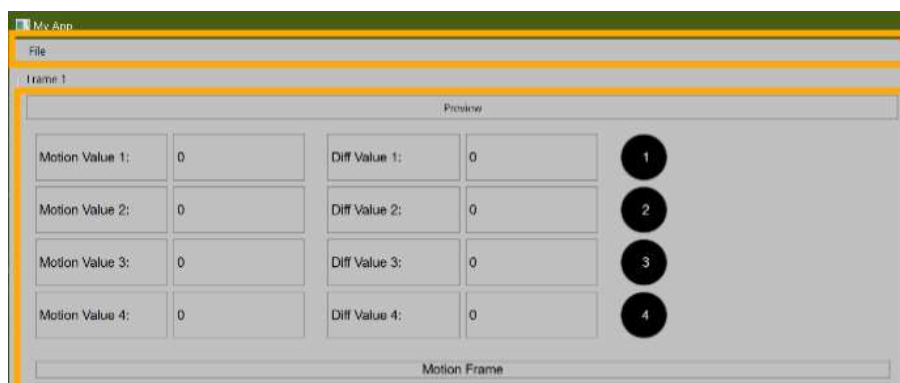


Рисунок 49 – Модуль измерения блок 1

1 -отображение численного значения измеряемого параметра; 2 – наименование единицы измерения; 3 – индикатор сигнализации.

Единицы измерения представлены в пикселях, но после калибровки ВОД, их переводят в необходимые величины. АПКТК^{KP} контролирует техническое состояние ВОК по дополнительным потерям, которые связаны с изменением интенсивности световой волны, если ВОК будет разорван, то потери будут максимальными и АПКТК^{KP} выдаст максимальное значение, которое будет соответствовать разрыву ВОК. АПКТК^{KP} является интеллектуальным продуктом и имеет возможность обучаться, поэтому его окончательная настройка производится непосредственно на самом объекте, для формирования библиотеки световых пятен при отделённых уровнях воздействия и помех.

Единицы измерения выбраны в пикселях, но их можно заменить на иные. АПКТК^{KP} автоматически выполняет корректировку их соотношений и размерностей, для этого разработан программный алгоритм. Используемая единица измерения «пиксель» нужна для построения графиков зависимости. У каждого выводится строка с отображением численного значения измеряемой величины, запятая устанавливается автоматически. У каждого канала есть индикаторы для отображения состояния сигнализации. Индикаторы состояния сигнализации показаны четырьмя черными кругами, в которых указаны цифры 1 – 4, каждый индикатор относится к своему каналу. Индикаторы 1 – 4 меняют свой цвет в зависимости от режима работы АПКТК^{KP}. Зеленый цвет индикатора

означает нормальную работу АПКТК^{KP}, когда нет никаких событий, связанных с воздействием на ВОК. Желтый цвет индикатора означает, что на ВОД было оказано воздействие или возникли помехи, это просто предупреждающий сигнал, не имеющий действия. Красный цвет индикатора означает, что на ВОД было оказано достаточно сильное и неоднократное воздействие или начался процесс его разрыва или повреждения его присоединений. Желтый цвет индикатора означает также подозрение на попытку НД, а красный уже информирует о действии, связанном с НД. При срабатывании сигнализации подается звуковое оповещение и отправляется сообщение на мобильные устройства оператору или лицам, ответственным за эксплуатацию ВОК, при этом на экране загорается индикатор красного цвета того участка, на котором было зафиксировано воздействие на ВОК. Красный индикатор в случае, когда параметры изменяются достаточно быстро за короткий промежуток времени, резком всплеске или когда количество зарегистрированных срабатываний (детекции воздействий), случившихся подряд за установленный отрезок времени, превысили заданный порог уставки. АПКТК^{KP} также выполняет контроль параметров дополнительных потерь на каждом из четырех участков, на которых работают квазираспределенные ВОД.

При нажатии кнопки «File» открывается меню для настройки фотоматрицы каждого канала. Администратор или пользователь с правами администратора может выполнить настройку или внести определённые корректировки в работу АПКТК^{KP}. Можно выбрать для настройки фотоматрицу определённого канала, зайти в меню настроек и установить необходимые параметры. Как сказано ранее, АПКТК^{KP} имеет четыре канала в первом модуле, поэтому в данном варианте настройку можно проводить только четырех фотоматриц высокого разрешения (рисунок 50).

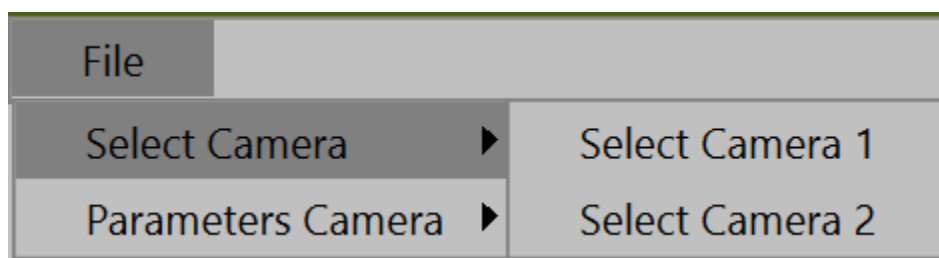


Рисунок 50 - Меню настроек программы

При использовании фотоматриц с разрешением 1080p (Full HD) будет всего 1920 колонок, а также 1080 строк пикселей, это даст 2 073 600 пикселей в общем. При использовании фотоматриц с меньшим разрешением, это разрешение 720p (HD), будет всего 1280 колонок и 720 строк пикселей, как показали практические опыты, этого вполне достаточно, будет 921 600 пикселей в общем. Также можно отметить, что по результатам проведённых практических опытов, хороших результатов по распознаванию изменения образов светового пятна и контроля интенсивности вполне пригодны фотоматрицы с меньшими параметрами разрешения. Например, можно использовать фотоматрицы формата VGA, у которых разрешение составляет 640 колонок и 480 строк, это 307200 пикселей в общем. Данные от графического микропроцессора фотоматрицы передавались на персональный компьютер при помощи шнура USB. Можно применять как USB 2.0, так и USB 3.0. Для обеспечения устойчивой работы ВОД фотоматрица должна быть оснащена 8- или 10-разрядным АЦП. Проводилось тестирование двух видов фотоматриц типа CMOS и CCD, по результатам тестирования обе матрицы справились со своей задачей, но был сделан выбор в пользу фотоматрицы CMOS, которая является более низкой по своей стоимости и обладающем малым энергопотреблением в сравнении CCD. Желательно, чтобы фотоматрица должна обеспечивала съемку светового пятна со скоростью не менее 30 кадров в секунду. Можно отметить, что фотоматрица CCD показала более высокое качество видеоизображения по сравнению с CMOS, но она имеет более высокую стоимость, что отразится на стоимости АПКТК^{КР} в целом, а это создаст угрозу его внедрения из-за слишком высокой стоимости. Предлагаемый опытный образец АПКТК^{КР} основан на фотоматрицах типа CMOS с разрешением

720p (HD). В более ранних версиях АПКТК^{K1} и АПКТК^{K2} были использованы фотоматрицы с меньшим разрешением 640 колонок и 480 строк, формата VGA, это разрешение вполне достаточно для любого по протяженности квазираспределённого ВОД. Используются фотоматрицы с пластиковой линзой, это более бюджетный и недорогой вариант, но имеются недостатки в правильности отображения светового пятна, не всегда удается передать в естественных цветах, в отличие от стеклянной линзы, которая передает изображение светового пятна в более натуральном цвете. Данное обстоятельство не критично, так как ведётся контроль не изменения цвета, а только интенсивности светового пятна. Тестирование различных линз показало, что вполне приемлем более бюджетный вариант. Это позволит снизить стоимость АПКТК^{KP} и сделать его более привлекательным для будущих потребителей по своей стоимости, что порой является основой успешного внедрения. То же касается фокусировки фотоматрицы, после тестирования выбран ручной вариант фокусировки, который вполне приемлем по стоимости. Так как настройка ВОД производится однократно и изменение фокусировки не требуется, то от более дорогого варианта автоматической фокусировки можно отказаться. В приложении К показана имитация работы сигнализации, когда подряд было несколько мощных импульсных воздействий на три ВОД блока 1 и один ВОД блока 2. Разность настроек ВОД третьего канала не позволила сигнализации сработать, так как чувствительность ВОД была намерено снижена. Четвертый канал был настроен немного иначе и его чувствительность была немного выше, чем у третьего канала, поэтому его сигнализация тоже сработала. Срабатывание сигнализации полностью зависит от настройки чувствительности канала и других параметров. Настройка фотоматрицы - достаточно сложный и трудоемкий процесс, которым может заниматься только подготовленный специалист сервисной службы, поэтому часть меню для обычного пользователя закрыта, так как можно случайно сбить все настройки и нарушить работу АПКТК^{KP}. Для настройки фотоматрицы сначала выбирается «Меню выбора камеры».

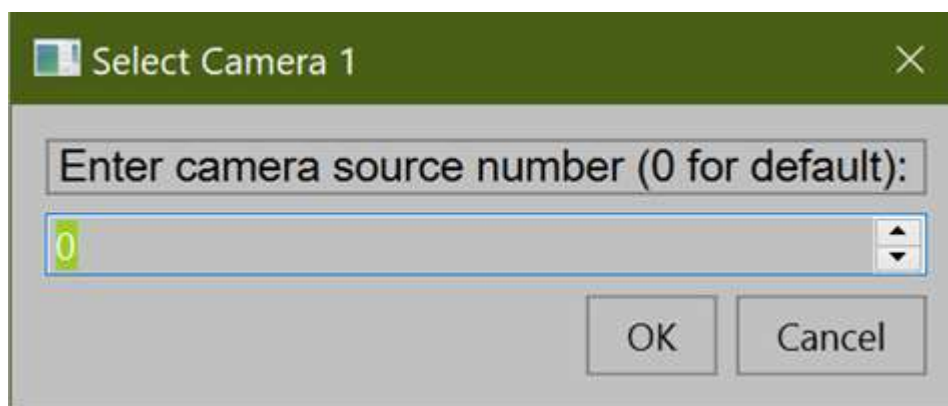
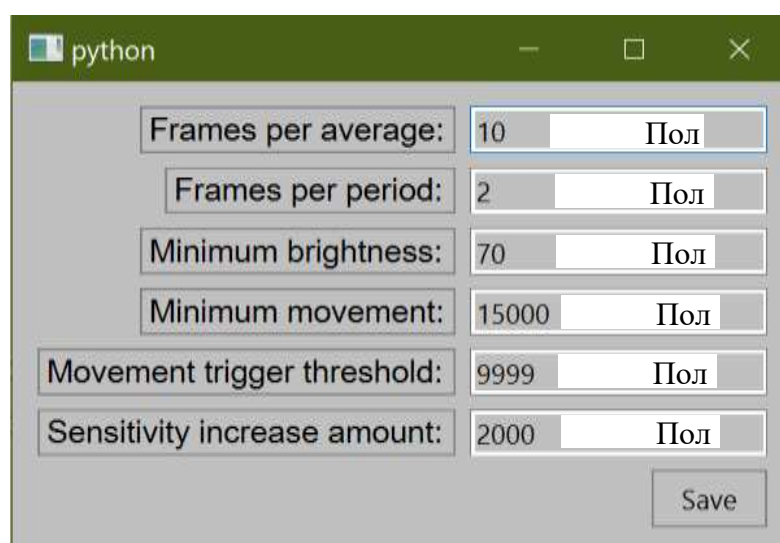


Рисунок 51 - Меню выбора камеры

Матрицы в операционной системе нумеруется с 0 индекса, выбор матрицы показан на рисунке 52, также представлены основные строки для настройки камеры. Поле ввода 1 устанавливает число кадров, которое фиксируется фотоматрицей в установленный период времени. После чего данные подвергаются усреднению и объединяются в единое изображение. Это снижает помехи и шумы, сформированные самой фотоматрицей или источником оптического излучения. Увеличение заданного параметра приводит к увеличению времени реакции детектирования.



Рисунке 52 - Меню настроек параметров камеры

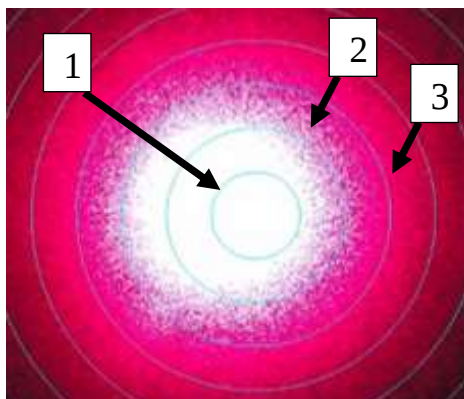
Фотоматрица имеет возможность четко фиксировать до 30 кадров в секунду. Обработка каждого нового изображения займет около 0,33 секунд. Если нужно изменить данный параметр, то необходимо выполнить перезапуск программы, для этого нужно нажать кнопку «стоп» и запустить программу в работу повторно. Этот параметр оказывает прямое влияние на чувствительность и время реакции АПКТК. Поле ввода 2. Это поле используется для задания значения, которое учитывает измерения значений или количество изображений за один период детекции. Данный параметр используется для установки периода, когда контролируется, сколько изображений нужно использовать для выявления движения, при этом задается любое значение, но минимальным значением является 2. Поле ввода 3. Данное поле используется для прямого задания параметра, который учитывает пороговое значение цвета пикселя от 0 до 255, но в градациях серого цвета. Это значение, при достижении которого сработает предупреждающий сигнал. Используется также для оценки уровня воздействия на ВОК, превращение пикселей в белый цвет. Картина пикселей следующая: 0 = черный, 255 = белый, 1-254 = оттенки серого. Этот параметр оказывает прямое влияние на чувствительность АПКТК. Поле ввода 4. Это поле используется для ввода параметра, который учитывает количество срабатываний (воздействий) подряд до наступления сигнала «ТРЕВОГИ». Поле ввода 5. Данное поле используется при вводе параметра порога срабатывания при определенном количестве белых пикселей и фиксации движения при превышении. При этом фиксируется воздействие на ВОК. Поле ввода 6. Данное поле предназначено для ввода численных значений для контроля порога чувствительности, количество воздействий за определениями промежутков времени на ВОД в заданном значении N. Воздействия должны быть сделаны подряд с небольшим перерывом, как при НД. Если воздействий нет, то значение будет снижено до исходного числа поля 6.

В публикациях [164,165, 187,188] уже были рассмотрены вопросы работы блока обработки данных и ВОД, а также отражены моменты работы аппаратно-

программной части СК, частично были рассмотрены в статьях [163,204,210]. АПКТК^{KP} подвергался неоднократным усовершенствованиям и модернизациям по мере накопления опыта его использования, даже в представленном виде он не является окончательной версией, ведется работа над его совершенствованием и расширением количества контрольно-измерительных каналов. АПКТК^{KP} способен одновременно работать с распределенными и квази-распределенными ВОД, для достижения этого результата понадобилось достаточно много времени, так как АПКТК^{K1} и АПКТК^{K2} могли работать только с квази-распределенными ВОД. Соответственно понадобилось усовершенствовать не только аппаратную часть и дополнить ее рефлектометром, но и существенно доработать программную часть, которые были направлены на повышение его потребительских свойств. В настоящий момент АПКТК^{KP}, является универсальным средством для контроля технического состояния как ВОК, так и различных протяженных объектов (мосты, плотины, насыпи, трубопроводы, кабели и др.), а также смещения грунтов, то и публикации, представленные автором, охватывают различные сферы промышленности.

Функции и принцип работы АПКТК^{KP}, а также интеллектуальный метод контроля обработки данных полученных от ВОД, уже были раскрыты в [194-217], а также отражены в материале глав 2 и 3. При переводе АПКТК^{KP} в режим настройки фотоматрицы появляется окно с изображением светового пятна. Также можно запустить отображения графиков в режиме реального времени. На рисунке 53 отображена важная информация для понимания сущности оптико-цифрового контроля параметров светового пятна, а именно его интенсивности и оценки дополнительных потерь, сформированных в ОВ при микроизгибе. ПС формируется на торце ОВ и, проходя через прозрачный экран, падает на поверхность фотоматрицы. Фотоматрица передает изображение на экран компьютера, это позволяет выполнить настройку оптического модуля и установить правильную фокусировку. Наиболее яркой является сердцевина у нее максимальная интенсивность, она является неинформативной и с ней невозможно

работать из-за значительного шума, поэтому свет, выходящий из сердцевины, не используется в оптико-цифровом анализе.



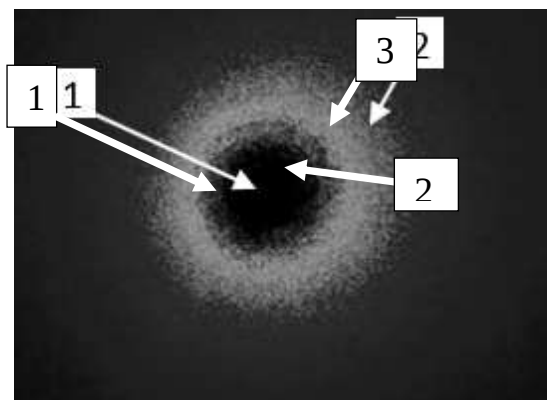
Рисунке 53 - Интенсивность излучения светового пятна

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

Наблюдается граница раздела, перехода световой волны из сердцевины в оболочку. Это достаточно проблемная область, так же как и в сердцевине создается много помех, которые негативно влияют на работу АПКТК^{КР} и требуют подавления. Зона 2 имеет интенсивность излучения границы раздела между сердцевинной и оболочкой, это зона формирования шума. АПКТК^{КР} работает в 3 области светового пятна, которое аналогично пятну Пуассона и подчиняется закону распределения Гаусса. Интенсивность излучения оболочки самая низкая из трех зон, именно она используется в оптико-цифровом анализе [165]. Световое пятно представлено в позитивном изображении, далее уже АПКТК^{КР} производит его преобразование в негативное изображение для проведения оптико-цифрового анализа потерь световой волны, сформированных в оболочке. Для анализа используются интеллектуальные возможности программы Python. Если на ВОК не оказывается механическое воздействие, то картина пятна остается неизменной, а если оказывается, то интенсивность его изменяется в прямой пропорции от сформированных потерь, так как часть световой волны вышла из ОВ. Данный метод имеет преимущество перед другими, так как позволяет контролировать

потери и одновременно фиксировать воздействие на ВОК даже если потери были минимальные, но было отмечено несколько воздействий с определённой частотой повторения за определенный промежуток времени. На рисунке 54 представлено негативное изображение светового пятна.

Как видно после программного преобразования зона 2 уменьшилась и размылась, а ее границы уменьшились, соответственно снизился уровень шума, который генерируется лазером и внешними воздействиями на ОВ. Например, различными вибрациями или изменением температуры. Проведенные опыты показали, что колебания температуры в пределах $\pm 20^0$ С не вызывает всплесков помех в области 2, что принципиально отличает предлагаемый метод от известных методов интерферометрии и рефлектотрии [164, 165]. Проводится оптико-цифровой анализ потерь световой волны, сформированных в оболочке, при этом области 1 и 2 исключаются. Контролируется изменение параметров светового в области 3, как сказано ранее, в случае механического воздействия часть излучения покидает сердцевину и попадает в оболочку.

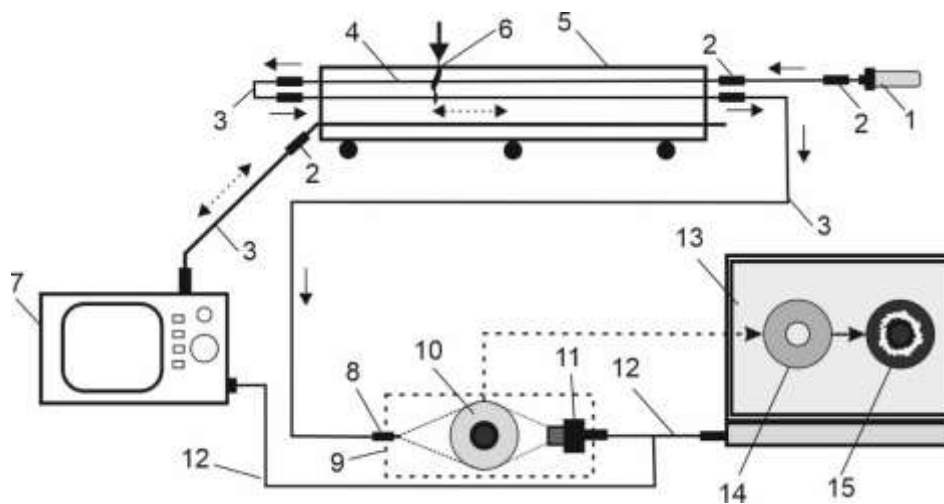


Рисунке 54 - Интенсивность излучения светового пятна

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

Отличием от известных методов оптической интерферометрии и рефлектотрии 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. От полупроводникового лазера 1 оптическая волна длиной 650 нм и мощностью 30 мВт проходит через оптический коннектор 2, оптический патч-корд 3 и попадает в ОВ, позиция 4, которое является ВОД. ВОД находится внутри ВОК, позиция 5. На участке 6 ВОК подвергается механическому воздействию, и ОВ, находящееся в нем, деформируется, соответственно параметры световой волны на выходе меняются. ВОК находится на опорах или точках крепления 8. К ВОК также подключен оптический рефлектометр 7 для точного определения места повреждения ВОК. На выходе из ВОД установлен оптический модуль 9, в котором находится прозрачный экран, на котором проецируется ПС 10, после чего оптическая волна падает на поверхность фотоматрицы 11, которая преобразует оптический сигнал в электрический и производит его предварительную обработку при помощи встроенного графического микропроцессора. Чтобы понять, как работает АПКТК^{КР}, можно рассмотреть схему на рисунке 55. Далее уже цифровой сигнал передается по соединительному кабелю USB, позиция 12, на персональный компьютер 13, на котором установлена программа для окончательной обработки информации и выдачи численных значений измеряемой величины. На экране компьютера отображается процесс обработки данных и преобразования светового пятна, в негатив 14, а после анализа параметров светового пятна и картины пикселей формируется численный результат контроля. При механическом воздействии на ВОК (ВОД) изменяется коэффициент преломления ОВ, находящегося внутри ВОК, соответственно изменяются параметры светового пятна, которые фиксируются фотоматрицей, установленной на выходе из ВОД.



Рисунке 55 – Поясняющая условная схема

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.

Программа производит обработку данных, анализирует все изменения параметров и выдает численное значение. Программа фиксирует изменения пиксельной картины светового пятна, так как при механическом воздействии на ВОК будет переход пикселей из одного цвета в другой, от черного к белому. Производится сравнение параметров светового пятна с течением времени, через контроль перехода пикселей от одного цвета к другому. Чем выше значение воздействующей силы на ОВ, тем больше формируется его микроизгиб, соответственно тем больше будут дополнительные потери. Так как часть энергии световой волны покидает сердцевину ОВ, соответственно меньшая ее доля достигает фотоматрицы, соответственно световое пятно теряет свою интенсивность. При проведении экспериментов установлено, что численное значение дополнительных потерь, сформированных при микроизгибе ОВ прямо пропорционально воздействующей силе на ВОД, а также изменению численной картины пикселей и перехода их из черного цвета в белый. АПКТК^{КР} контролирует изменения интенсивности светового пятна не одним пикселем, а

множеством по всей площади. Эксперименты показали, что при попытке произвести НД к информации наблюдаются периодические колебания интенсивности, например при попытке подключиться к ВОК. На рисунке 56 представлено несколько случаев фиксации воздействий на ВОК с различной силой в течение определённого времени.

склеиваются герметиком, который не допускает проникновения внешних лучей света внутрь. В процессе проведения были изготовлены различные варианты оптического модуля с цилиндрическим и квадратным волноводом, Приложение К. На конце ОВ находится оптический коннектор SC с ферулой диаметром 2,5 мм и разъемом UPC Ultra.

Как показали результаты экспериментов, рассмотренных ранее в 3 главе, при приложении силы к ВОД в нем формировался микроизгиб, а это в свою очередь приводило к увеличению дополнительных потерь и снижению интенсивности светового пятна. Опыты показали, что при увеличении приложенной силы по линейному закону, снижается интенсивность светового пятна. Снимки с экрана компьютера демонстрируют, как теряется оптическая мощность проходящей по ОВ световой волны при росте нагрузки на ВОД.

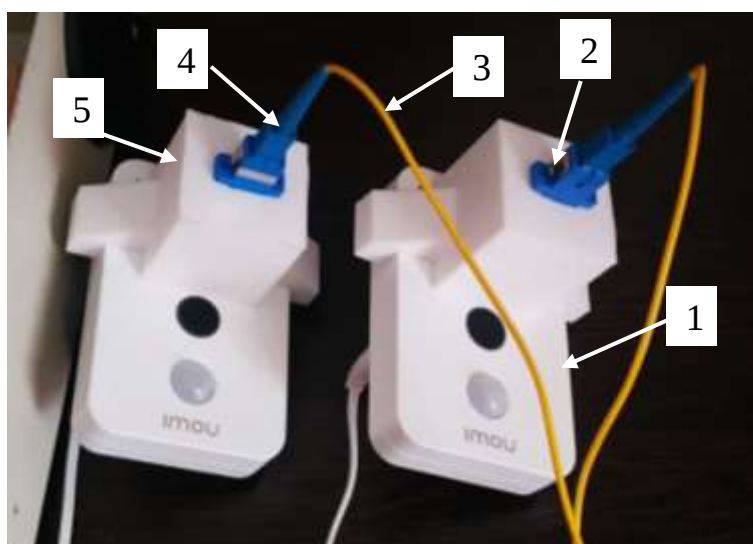
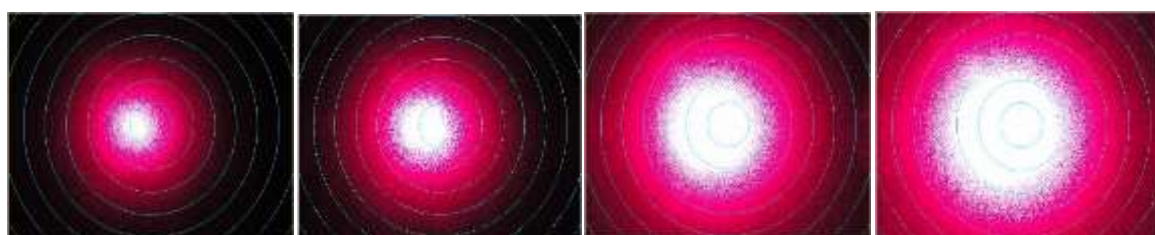


Рисунок 57 – Оптический модуль (с квадратным оптическим волноводом)

1 – фотоматрица с графическим микропроцессором; 2 – оптический адаптер; 3 – оптический проводник; 4 – оптический коннектор; 5 – оптический волновод.

На рисунке 58 показано, как уменьшается размер светового пятна при возникновении дополнительных потерь в ОВ, это когда на ВОД было оказано механическое воздействие. Всего представлено четыре картинки светового пятна, первое изображение (слева) показано при максимальной нагрузке на ВОД, а дальше нагрузка снижалась, при этом световое пятно, а именно его интенсивность

увеличивалась. При проведении экспериментов было установлено, что аналогично интенсивность снижается с увеличением протяженности контрольно-измерительного канала ВОД [163-165, 187-189]. Например, для длины ВОД от 1 до 40 км, желательно работать на длине оптической волны 650 нм. Для такой длины волны в одномодовом ОВ характерны значительные потери, которые могут составлять единицы децибел. Поэтому рекомендованная мощность лазера для участка длиной в 40 км должна быть не менее 100 мВт для 16 контрольно-измерительных каналов ВОД. Если число каналов будет 32, то мощность должна быть не менее 200 мВт. Если длина контрольно-измерительных каналов ВОД будет от 40 до 60 км, то необходимо переходить на длину волны 800-900 нм, если еще больше, то здесь уже не обойтись без инфракрасного диапазона волны 1310 нм и 1550 нм.



а)

б)

в)

г)

Рисунок 58 - Изображение падающего на поверхность фотоматрицы светового пятна при различной нагрузке

а – максимальная нагрузка; б, в – нагрузка снижается, г – нагрузка снята полностью

Для длины контрольно-измерительных каналов ВОД до 40 км понадобится лазер мощностью менее 100 мВт, потеря интенсивности светового пятна решается за счет возможностей программы и настройками фотоматрицы. Если использовать длину невидимой глазу волны в инфракрасном диапазоне от 900 до 1550 нм, то в таком случае придется перейти на другой вид фотоматрицы, способной видеть в инфракрасном диапазоне. Стоимость такой матрицы и лазеров уже гораздо выше в сравнении с используемыми, это касается и лазеров. Как показали эксперименты, АПКТК^{КР} работает с лазерами с длиной волны от 650 нм

до 850 нм, при этом матрица от камер видеонаблюдения способна работать с инфракрасной подсветкой CMOS с разрешением 720p (HD) и выше. Матрица от камер видеонаблюдения воспринимает световые пятна достаточно хорошо и без искажения, то же можно сказать о матрица от веб-камер. Разработанный опытный образец четырехканального АПКТК^{КР} с четырьмя квази-распределенными ВОД, а также его ранние версии способны работать на дистанции до 40 км. Что касается работы АПКТК^{КР} с распределенным ВОД, то длина контрольно-измерительного канала зависит от разрешающей способности оптического рефлектометра, использованный OTDR YOKOGAWA AQ1200E способен работать на дистанции до 500 км, с разрешающей способностью менее 1 метра.

В итоге изменение интенсивности выражается в изменении численной картины пикселей, которые АПКТК^{КР} (тоже касается и более ранних версий) выражает в численном значении измеряемой величины, например силе воздействия на ВОК. На рисунке 59 показан процесс роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД, рост показан слева направо

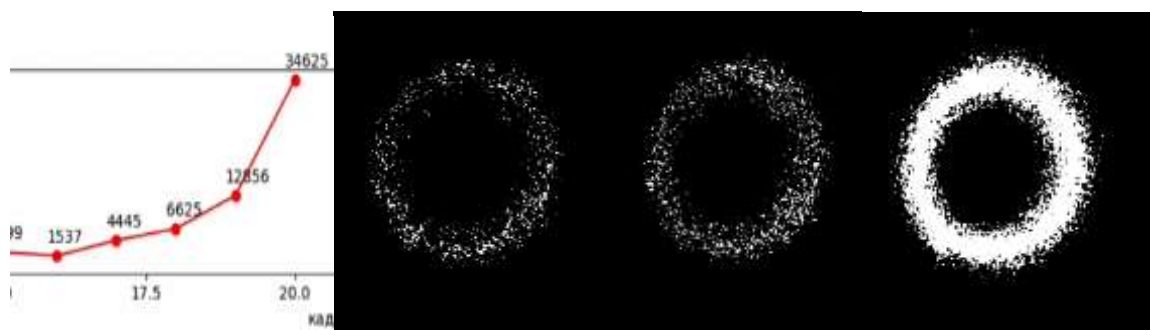


Рисунок 59 - Процесс роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД [163-165, 187-189]

Программа также строит график, отображающий численный рост белых пикселей при росте нагрузки на ВОД, фрагмент графика показан в левой части рисунка, более подробно можно ознакомиться с графиками в статьях [163-165, 187-189, 218]. АПКТК^{КР} использует интеллектуальный оптико-цифровой анализ,

преобразовывает изменения параметров интенсивности светового пятна и дополнительных потерь. Он трансформирует все изменения в изменения численной картины пикселей при их переходе из одного цвета в другой. Исследования показали, чем выше сила, приложенная к ВОД, тем более значительное изменение интенсивности ПС. Это связано с ростом дополнительных оптических потерь. Потери выходят в оболочку и распространяются по ней, рост белых пикселей напрямую связан с ростом оптических потерь в ОВ. Все потери оптической мощности фиксируются фотоматрицей и после обработки данных, на экране компьютера можно наблюдать картину пикселей. Количество сформированных белых пикселей пропорционально силе внешнего воздействия формирующей микроизгиб ОВ. При изменении параметров нагрузки по линейному закону изменяются параметры дополнительных оптических потерь, значение интенсивности светового пятна и количества белых пикселей изменяются. Наблюдается строго пропорциональная зависимость, при этом кривая подчиняется линейному закону аппроксимации.

Картина пикселей светового пятна может иметь отличие и зависит от типа применяемого оптического волновода и материала, типа фотоматрицы и ее разрешения, настройки фокусного расстояния, наличия прозрачного экрана или его отсутствия. Проведено множество экспериментов, которые позволили добиться более четких форм светового пятна, зависящих от конструктивных параметров оптического модуля. В приложении Д представлен один из вариантов полученного светового пятна. Пиксельная картина может быть различной по очертаниям и форме, но всегда при увеличении нагрузки на ВОК характерен одинаковый рост количества белых пикселей по линейному закону аппроксимации. Показан процесс изменения численной картины и рост числа белых пикселей по мере увеличения приложенной силы на ВОД при изгибе ВОК. Белой стрелкой показаны возникшие помехи из-за шума лазера, которые программа не учитывает как полезный сигнал. Важным моментом является чувствительность АПКТК^{KP}, чем выше его чувствительность, тем выше и влияние помех. Поэтому программа проходит определенную настройку и

обучение для дальнейшего распознавания помех и роста нагрузки на ВОК или распознавания случая НД. На рисунке 60 показан снимок экрана, когда на ВОД было оказано внешнее вибрационное воздействие, это воздействие было зафиксировано АПКТК^{KP}, то же касается и более ранних версий. Это была имитация ветра, так как ВОК может подвергаться различным природным воздействиям. Программа может распознать помеху по различным критериям, например, установлено, что имеется разница в скорости роста количества белых пикселей при возникновении помех и воздействии. Помехи возникшие из-за нестабильности работы лазера или возможно внешнего вибрационного показаны белой стрелкой [163-165, 187-189].

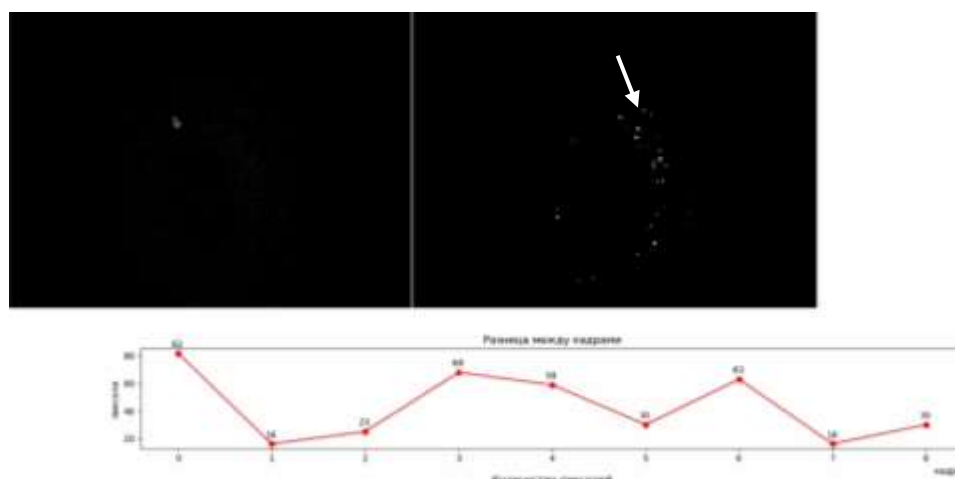


Рисунок 60 – Случай возникновения помех

На рисунке 61 показан снимок с экрана компьютера, где изображена картина пикселей светового пятна. В низу рисунка показан график роста количества белых пикселей, рост их количества является пропорциональным приложенной нагрузке на ВОД. На графике видна численность белых пикселей и рост их числа, в отличие от помех рост нагрузки имеет совершенно другой характер и другие параметры воздействия на ВОД, поэтому рост нагрузки и помехи имеют различное отображение в окне программы [163-165, 187-189]. В нижней части рисунка 61 показан график роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД. Количество белых пикселей выросло с 71310 единиц до 71330 единиц за 1

секунду. АПКТК^{КР}, то же касается и более ранних версий, способен обеспечить хорошую линейность измерений.

На рисунке 62 представлен снимок экрана, на котором отражен начальный момент запуска АПКТК, когда нет силового воздействия на ВОК. Эксперименты проводились в идеальных условиях лаборатории, когда температура в помещении не изменялась, не было воздействия снега, ветра, дождя и др.

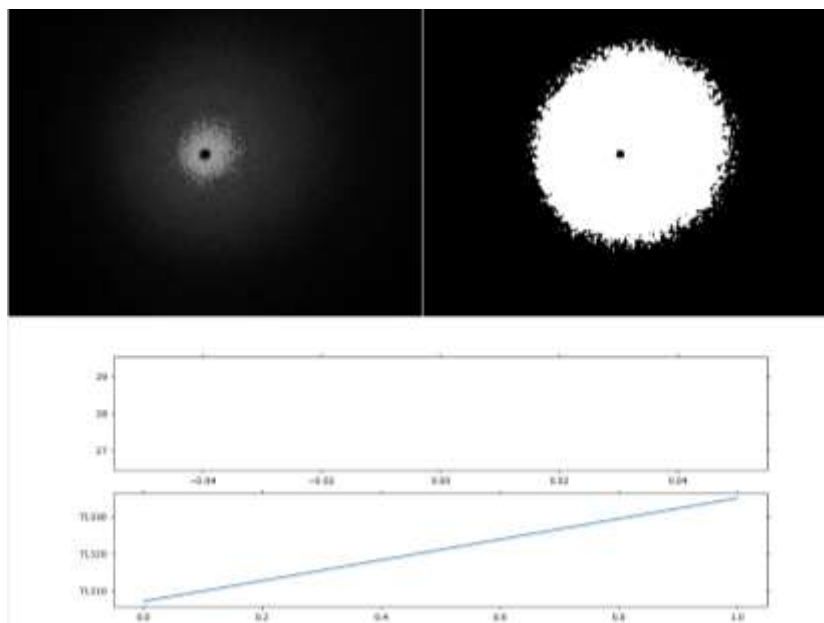


Рисунок 61 – Рост белых пикселей при росте нагрузки на ВОД

В реальных условиях обязательно будут присутствовать помехи, но их уровень будет в пределах десятков, а при сильном внешнем воздействии ветра, может быть, и сотни белых пикселей, поэтому программа будет отбрасывать эти значения как не существенные. Более существенный рост белых пикселей в сотни тысяч даже миллионы пикселей будет при силовом воздействии на ВОК или случае НД.

Экран в правой части окна программы при отсутствии силового воздействия на ВОК остается полностью черным. Число черных пикселей в системе отчета близко к максимальному для матрицы 1080p (Full HD) количество пикселей равно 2 073 600, для матрицы 720p (HD) количество пикселей равно 921 600. На экране присутствуют отдельные белые пиксели, это помехи из-за шума лазера и его

нестабильной работы. Источник излучения должен быть когерентным. Шумы в большей мере создаются источником излучения, для нейтрализации важно иметь когерентный источник излучения с минимальным уровнем пульсации не более 5 нм при длине волны 650 нм. Важным моментом является достижение когерентности лазера. Отдельные белые точки в левой части окна программы, это помехи. Их количество не велико, в максимуме равно 9 единицам при максимальном значении белых пикселей равным 921 600, для матрицы 720p (HD). На графике показан рост белых пикселей, например с 2 до 9, а затем спад до 1. Программа распознает помехи, по скорости их роста за определенный период времени, по малому количеству сформировавшихся белых пикселей и характеру появления. Отдельные белые точки плохо видны на экране компьютера, но на них указывают белые стрелки (рисунок 62).

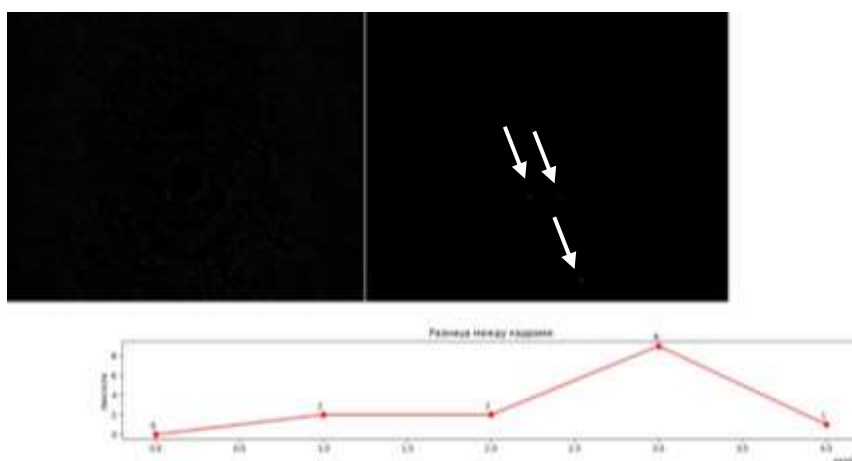


Рисунок 62 – Помехи, сформированные шумом лазера

Модуль 1, предназначен для одновременной работы с четырьмя квази-распределенными ВОД (рисунок 63).

Оранжевыми полосами выделены области с кнопками.

1) Кнопка предпросмотра видеопотока с камеры.

2) Числовые индикаторы и цветовые индикаторы. В первом столбце количество изменившихся пикселей по сравнению с эталоном, взятым при запуске. Во втором столбце показывается числовое значение разницы между двумя последними измерениями. Последний столбец цветовой индикатор

показывает статус канала: зеленый – работает, желтый - было зарегистрировано изменение (детекции движения) в канале, красный – количество зарегистрированных срабатываний (детекции движения) подряд заданный превысило порог.



Рисунок 63 – Интерфейс модуля 1

3) Шкалы для графического отображения числовых в процентном соотношении значений. Верхние четыре шкалы, показывающие количество изменившихся пикселей по сравнению с эталоном ограничены максимальным количеством пикселей теоретически возможных изменений для этого канала камеры. Нижние четыре шкалы, отображающие значение разницы между двумя последними измерениями ограничены установленным параметром порога срабатывания при фиксации воздействия на ВОК. Этот параметр задается при настройке программы. При превышении 100%, то есть заданного порога срабатывания детекции движения рядом с процентным значением в скобках пишется, во сколько раз было превышение.

4) Индикатор занимаемой оперативной памяти, показывающий, сколько кадров ждут своей очереди на обработку в количественном значении и в расчете занимаемой ими оперативной памяти в мегабайтах, где в скобках значится вычисленное значение, сколько мегабайт занимает один кадр, полученный с камеры. При отсутствии кадров очередь горит зеленым цветом, переполнении очереди рамка загорается красным цветом.

5) Блок кнопок, где кнопка Start – запуск мониторинга четырех каналов, Stop – остановка мониторинга, Toggle Graph/Progress Bars переключает вид с блока отображения шкал на график мониторинга.

Настройка модуля 1 показана на рисунке 64.

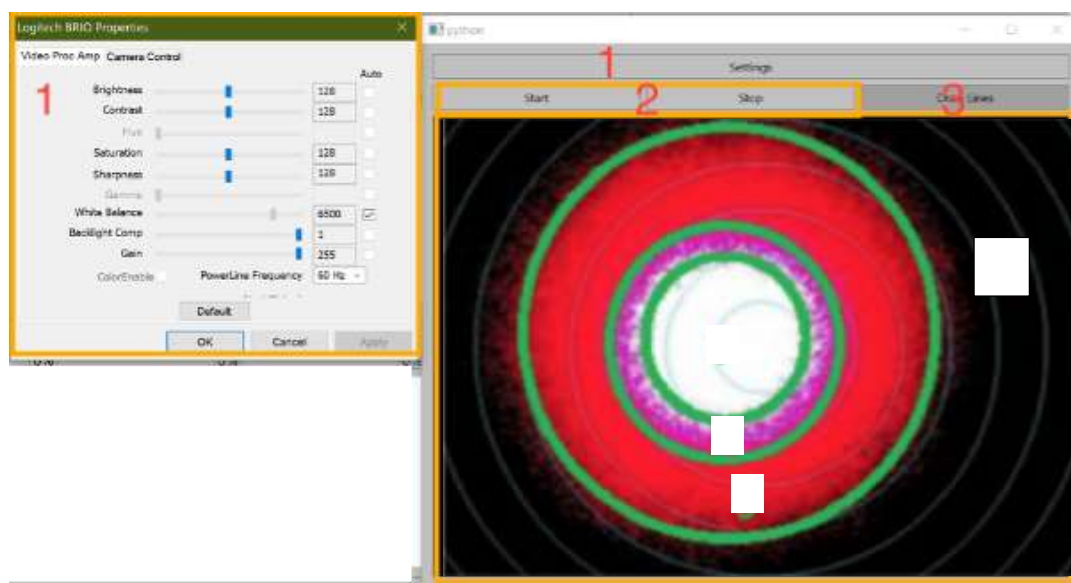


Рисунок 64 - Настройка модуля 1

- 1) Кнопка настроек, которая вызывает системное окно настроек камеры.
- 2) Блок кнопок для запуска и остановки предпросмотра.
- 3) Кнопка разделения на четыре равные части горизонтальной и вертикальной линией по центру изображения.
- 4) Изображение, получаемое с камер.
- 5) Сердцевина ОВ.
- 6) Граница раздела между сердцевинкой и оболочкой ОВ.
- 7) Оболочка ОВ.

Модуль настройки содержит кнопки при нажатии, на которые открывает различные окна, где можно выполнить необходимые для работы настройки. При нажатии на кнопки предпросмотра можно увидеть изображение с выбранной фотоматрицы для калибровки позиции светового пятна. Если нажать виртуальную клавишу выхода из меню, то это будет выходом из данного меню настроек фотоматрицы высокого разрешения. Можно настроить параметры фотоматрицы: яркости, контрастности, оттенков цвета, насыщенности, гаммы, баланса белого цвета, частоты развертки и др., есть возможность отцентрировать световое пятно, если оно будет смещено по кому-либо случаю, если данная настройка не решает проблемы, нужно выполнить механическую настройку оптического коннектора вводного устройства. Каждый канал имеет одинаковые настройки, где имеется набор функциональных кнопок для настройки и управления программой. Воздействие на ВОК может быть зафиксировано всеми каналами без исключения, но сработали сигнализации не всех каналов, только те, у которых был превышен порог срабатывания. Отдельно можно показать экран блока 1, на котором отображаются кривые изменения пикселей каждого канала с течением времени. Принцип работы АПКТК^{KP} основан на контроле картины пикселей, которая сопровождается изменением силы механического воздействия на ВОК и его ОВ, при этом в нем возникает фотоупругий эффект, что влечет за собой изменения коэффициента преломления из-за формирования микроизгиба, об этом уже было сказано ранее в главе 3. Имеется кнопка для демонстрации графиков и вывода их на экран, причем сразу могут отражаться четыре графика от четырех контрольно-измерительных каналов с ВОД (рисунок 65). Модуль 2 отвечает за работу с оптическим рефлектометром, который используется для точного определения места повреждения ВОК или НД. Окно программы представлено на рисунке 66. Данный модуль работает только одной фотоматрицей, отслеживающей изменение рефлектограммы, к нему подключается один ВОД. Если фотоматрица фиксирует изменения рефлектограммы, а это численные значения усреднённой величины рассеяния и дополнительных потерь, то АПКТК^{KP} автоматически включает рефлектометр в

свой анализ и на основании полученных данных выдает расстояние до места повреждения или НД.



Рисунок 65 - Программа в рабочем состоянии при обнаружении движения и тревоги

Используемый оптический рефлектометр специально разработан под удаленное сетевое управление и передачу данных, а также имеет необходимое программное обеспечение, при помощи которого можно выполнять его настройку. Оптический рефлектометр, может быть подключен к персональному компьютеру (ПК) при помощи сетевого шнура или USB кабеля. Все данные об измерениях передаются на ПК в цифровом виде и обрабатываются АПКТКР. Фотоматрица используется для фиксации изменений и запуска анализа данных, приходящих от оптического рефлектометра, который подключен к распределенному ВОД.

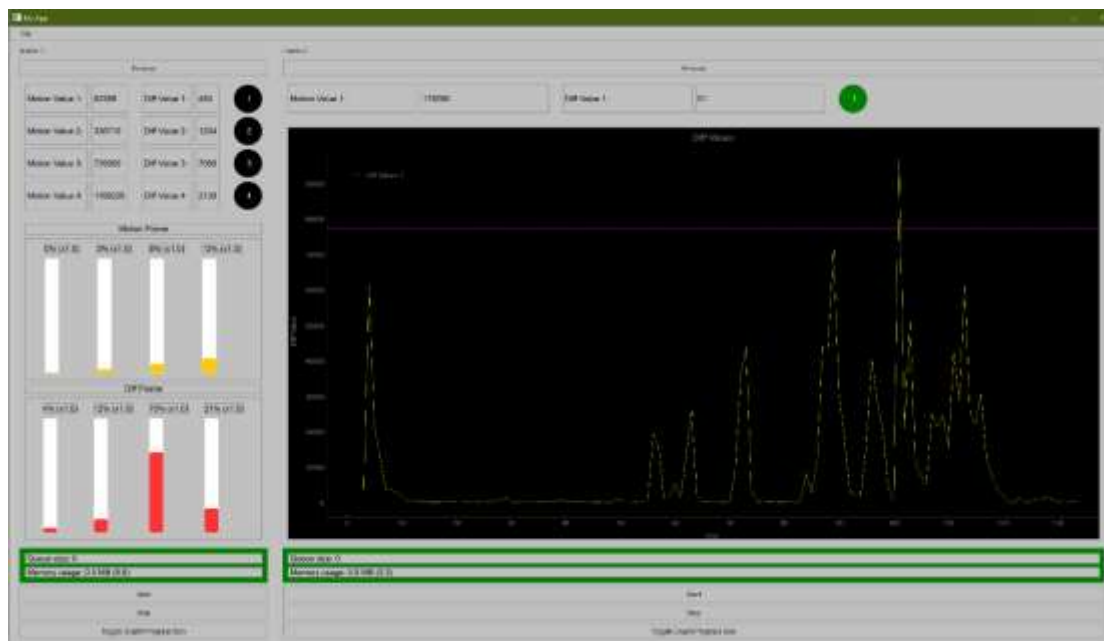


Рисунок 66 - Вид программы при запуске мониторинга рефлектометра при переключенном варианте отображения

При нажатии на кнопку старт АПКТК^{КР} запускается в работу и производит оптико-цифровой анализ параметров светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения. При этом активизируются все четыре индикатора, которые изменяют свой свет с черного на зеленый. Это значит, что все четыре квазираспределенных ВОД запущены в работу и с них считывается информация. Также запускается алгоритм обработки данных и приходит информация о параметрах светового пятна. АПКТК^{КР} запускает алгоритмы позволяющие отображение кривых на графике центрального окна модуля 1 и фиксировать все изменения оптических параметров ВОД в режиме реального времени в непрерывном цикле работы.

Модуль 2 выполняет идентификацию механического воздействия по контролю дополнительных потерь и уровня рассеяния. Настройка его единственного канала является идентичной настройке каналов модуля 1, но настройка порога его сигнализации была завышена больше, чем у каналов модуля 1. При активации кнопки показывается график, отображаются изменения рефлектограммы, которые возникают при воздействии на ВОД. Причины

когда фотоматрица будет фиксировать все изменения рефлектограммы, а в случае превышения уставки загорается красный индикатор и подается предупреждающий сигнал оператору. В этом случае уже в ручном режиме при помощи интерфейса рефлектометра можно установить точное место возникновения микроизгиба ОВ или повреждения ВОК. Разрешающая способность использованного в экспериментах оптического рефлектометра OTDR YOKOGAWA AQ1200E выше, чем у АПКТК^{КР}, и составляет 0,1 м, но так как возможно использование других оптических рефлектометров более низкого класса по разрешению и меньшей стоимости, а также для исключения ошибок и повышения надёжности результатов измерений, разрешающая способность АПКТК^{КР} ограничена до 1 метра. На рисунке 68 показано окно с отображением рефлектометра крупным планом (модуль 2).



Рисунок 68 - Окно с отображением рефлектометра крупным планом (блок 2)

В приложении К представлены два снимка экрана, где показана работа АПКТК^{КР} по окнам блока 1 и блока 2, представлен снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывание сигнализации в блоке 1 при воздействии на квазираспределенный ВОД, снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывание сигнализации в блоке 2 при воздействии на квази-распределенный ВОД.

АПКТК^{KP} не может автоматически выполнить поиск места повреждения при помощи рефлектометра, он осуществляется вручную, для реализации данной опции требуется масштабная доработка программного обеспечения, что нельзя выполнить в рамках данной работы. После того как оператор вручную определил точное место повреждения ВОК можно отправить технических специалистов для осмотра.

Программное обеспечение АПКТК^{KP} было разработано на основе языка программирования Python с использованием библиотек OpenCV (Open Source Computer Vision Library), эти компоненты позволяют создавать программное обеспечение (ПО) с открытым исходным кодом, которое может работать в области интеллектуальных технологий и компьютерного (машинного) зрения. Использование в исследованиях интеллектуальных технологий и компьютерного (машинного) зрения оправдано конечными результатами и достижением цели данной работы, так как без использования интеллектуального анализа невозможно снизить влияние помех на работы ВОД. У библиотеки OpenCV есть возможности для одновременной работы с несколькими алгоритмами для обработки видеоизображений и распознавания образов объектов, а также отслеживания движения объектов или иных научных и инженерных задач машинного зрения. При разработке данного АПКТК^{KP} была задействована одна из версий OpenCV, которая подходит для языка Python. Также были задействованы возможности библиотеки NumPy, которая используется для работы с многомерными массивами, линейной алгеброй и математическими операциями. Библиотека NumPy используется для работы с другими научными и аналитическими библиотеками Python. Для работы с огромными массивами данных «биг дата» можно использовать программу NumPy, которая позволяет реализовать алгоритмы оптимизации производительности. Модуль PyQt6 применяется для предоставления базовых классов, это обеспечивает возможность работать с фреймворком Qt, что является кросс-платформой для разработки приложений с графическим интерфейсом (рисунок 69).

АПКТК^{КР} способен осуществлять регистрацию полученных данных от распределенных и квазираспределённых ВОД. АПКТК^{КР} выполняет ведение логов с течением времени, которые записываются на жёстком диске компьютера или сервера, все данные, полученные за текущее время работы. Если есть необходимость просмотреть данные, то можно прокрутить колесико мыши.

Время регистрации даны	Время регистрации даны	Время регистрации даны	Время регистрации даны
22:43:53:635	22:43:36:399	22:44:25:701	
22:43:57:632	22:43:36:958	22:44:26:742	
22:44:24:810	22:43:37:527	22:44:29:863	
	22:43:40:319		
	22:43:40:880		
	22:43:41:441		
	22:43:42:001		
	22:43:46:470		

Рисунок 69 – Блок регистрации движения с ведением логов по времени

АПКТК^{КР} имеет функцию телеметрии и обладает возможностью автоматически передавать сообщения оператору и другим лицам, ответственным за эксплуатацию ВОК, на мобильные устройства. Для передачи сообщений используются беспроводные телекоммуникационные каналы передачи информации, например, сотовой связи. Также при использовании телекоммуникационного конвертора можно передать данные по ВОЛП. Автоматическая рассылка уведомлений выполняется с помощью кроссплатформенной системы мгновенного обмена сообщениями (мессенджер) Telegram. Для рассылки сообщений о сигнале «тревога» использован модуль Requests языка Python и https запрос через интерфейс API Telegram (рисунок 70).



Рисунок 70 - Запрос через интерфейс API Telegram

Для отправки сообщений оператору и другим ответственным за эксплуатацию ВОК лицам на мобильные устройства применяется Telegram-бот, который добавлен в чат группы, в которой будут находиться клиенты, подписанные на автоматическую рассылку сообщений (рисунок 71).

4.2 Калибровка АПКТК при помощи силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4

АПКТК и ВОД были откалиброваны при помощи силовоспроизводящей машины. МСВ-10МГ-4, которая находится на балансе Национального центра экспертизы и сертификации республиканского государственного предприятия КазСтандарт (Казахстанский институт стандартизации и метрологии). Так как данная машина используется для проведения поверки и калибровки различных тензодатчиков, то содержится в исправном состоянии и проходит своевременную поверку. На рисунке 73 представлена фотография силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4 перед началом калибровки, а также показано использованное оборудование для калибровки ВОД.

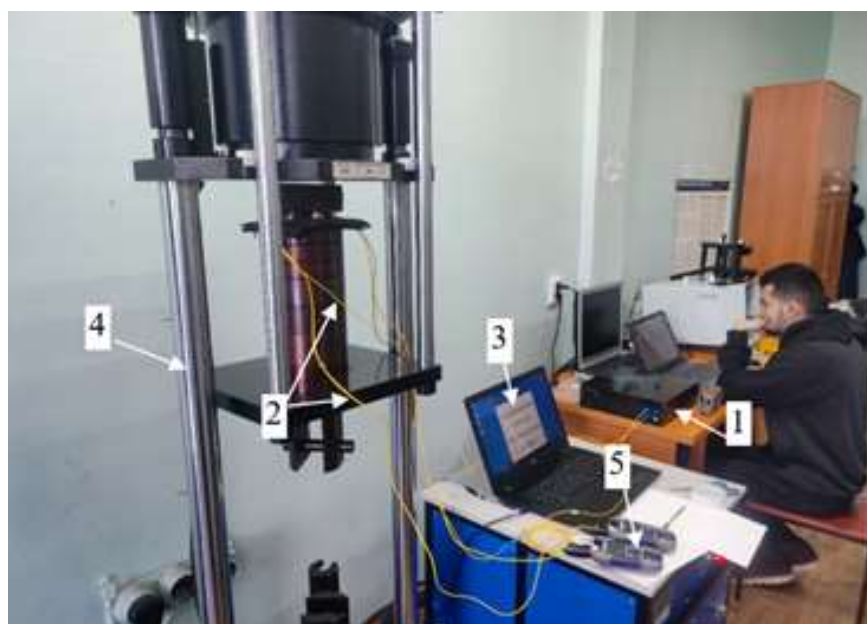


Рисунок 73– Силовоспроизводящая машина МСВ-10МГ-4

1 – испытуемая АПКТК; 2 – ВОД; 3 – монитор для вывода параметров нагрузки; 4 – силовоспроизводящая машина; 5 – приборы для измерения оптической мощности и потерь.

Эксперимент был спланирован, определены начальные и граничные условия, по аналогии с проведёнными ранее экспериментами, рассмотренные в 3 главе. ВОД имеют одинаковую длину, равную 15 метрам, а также одинаковую

конструкцию и технические параметры ОВ. Используемые контрольно-измерительные приборы показаны на рисунке 74. АПКТК может измерять и отображать различные параметры, в том числе и дополнительные потери, по которым он был откалиброван.

Схема проведения калибровки и результаты представлены в приложении К. Так как в качестве измерителя оптической мощности (дополнительных потерь) был использован прибор SmartPocket –38 (производитель JDSU, США), то он выдает показания дополнительных потерь в дБ.



Рисунок 74 – Контрольно-измерительные приборы

1 – монитор контрольно-измерительной системы силовоспроизводящей машины; 2 – источник оптического излучения; 3 – оптический измеритель мощности; 4 – испытуемая АПКТК; 5 – персональный компьютер с АПК.

Диапазон воспроизводимой силы 0,2-10 кН и предел относительной погрешности 0,02%. В состав силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4 входят две основные части: это орган нагрузки (силопроизводящая часть) и микропроцессорное контрольно-измерительное устройство, выдающее значение измерений на экран компьютера. Калибровка АПКТК проводилась по нагрузке (силе воздействия) воздействия на ВОД. АПКТК был подключен к двум ВОД, были задействованы только два контрольно-измерительных канала из четырех. Все показания выводились на экран компьютера.

Параллельно проводились измерения дополнительных потерь, сформированных при микроизгибе ОВ при определенном значении нагрузки. Для контроля оптической мощности (дополнительных потерь) использовался оптический ваттметр JDSU SmartPocket –38 (США), который работал в паре с источником излучения был использован прибор JDSU SmartPocket OLS-35 (США). На рисунке 75 представлено фото, на котором показан экран персонального компьютера с отображением графика и изменения картины пикселей, при росте нагрузки. Как видно на экране персонального компьютера отображается график роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД. График имеет достаточно высокую линейность, что свидетельствует об адекватной работе ВОД и АПКТК. Показания всех измерительных приборов фиксировались одновременно при помощи двух видеокамер. Показания измерителя оптической мощности (дополнительных потерь) сравнивались с показаниями АПКТК.

Данный прибор способен работать в автоматическом режиме и выбирать пределы измерения, а также длина оптической волны определялась автоматически, что существенно упростило проведение измерения оптической мощности (дополнительных потерь). Источник излучения работал в диапазоне от 650 до 1550 нм и переключался на различные длины волн. Соответственно АПКТК тоже выдавал значение в дБ и выбирал пределы автоматически, при малых значениях начального момента нагружения измерения производились в мдБ, а при увеличении нагрузки АПК автоматически перешел на дБ.

При увеличении нагрузки на ВОД было установлено, что дополнительные потери увеличивались, а оптическая мощность и интенсивность снижались. Все изменения подчинялись линейному закону. При увеличении нагрузки на ВОД измеритель оптической мощности показывал пропорциональный рост дополнительных потерь, а АПКТК показывал пропорциональный рост количества белых пикселей на своем экране, эти обстоятельства уже рассмотрены ранее в источниках [159 - 166], а полученные результаты полностью совпали с ранее полученными результатами по своей сути. На рисунке 75 показано окно АПКТК, когда он отражает параметры дополнительных потерь в ОВ при его микроизгибе

и выдает потери в дБ. Чем выше нагрузка на ОВ, тем выше значение дополнительных потерь.



Рисунок 75 – Измерительные приборы

На рисунке 76 показан случай, когда механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению микроизгиба, при этом часть световой волны покидает ОВ и выходит наружу, формируя дополнительные потери.

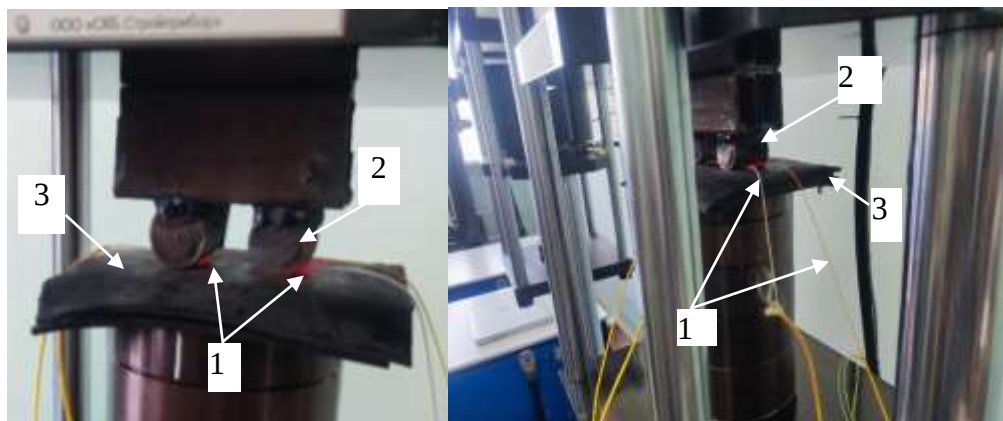


Рисунок 76 – Микроизгиб ОВ

1 – микроизгиб; 2 – металлический стержень; 3 – резиновое основание.

Места, где световая волна выходит наружу, светятся красным цветом, если то был бы невидимый глазу инфракрасный диапазон световой волны, то потери можно зафиксировать только при помощи приборов. Схема проведения эксперимента по калибровке АПКТК и ВОД представлена в приложении И, стрелками показано движение световой волны.

Как сказано ранее, в главах 2 и 3, механическое воздействие на ОВ приводит к возникновению микроизгиба и увеличению дополнительных потерь [159 - 166], это было подтверждено в процесс эксперимента, когда силовоспроизводящая машина постепенно увеличивала нагрузку на ВОД. ОВ размещалась на резиновом основании, и на него воздействовало два металлических стержня, которые формируют микроизгиб ОВ. В Приложении К представлены результаты калибровки АПКТК и ВОД. На рисунке 78 показан график роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД. Представлен график зависимости дополнительных потерь в зависимости от роста нагрузки при длине волны 650, 1310 и 1550 нм. Установлено, что большее значение дополнительных оптических потерь зафиксировано на длине 650 нм, поэтому данная длина оптической волны рекомендована для измерительного канала до 10 км. Меньшие потери характерны для волны 1550 нм, поэтому рекомендованная длина измерительного канала может быть 30 км и более.

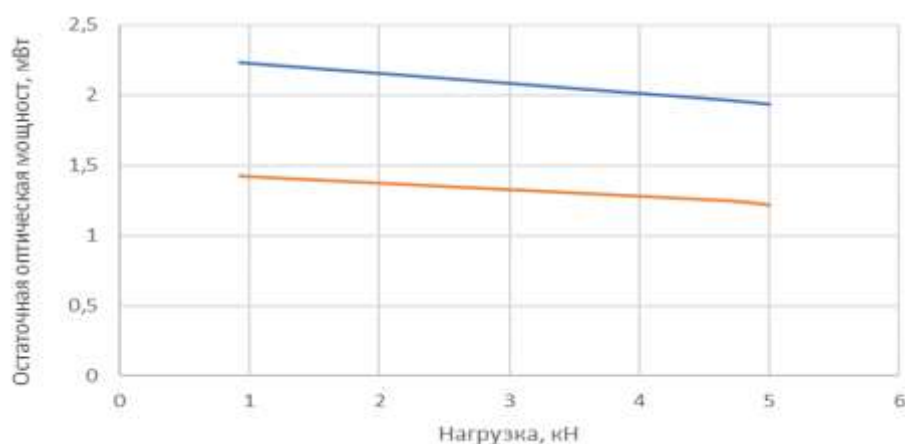


Рисунок 77 – График снижения оптической мощности при росте нагрузки на ВОД при длине волны 1310 нм и 1550 нм

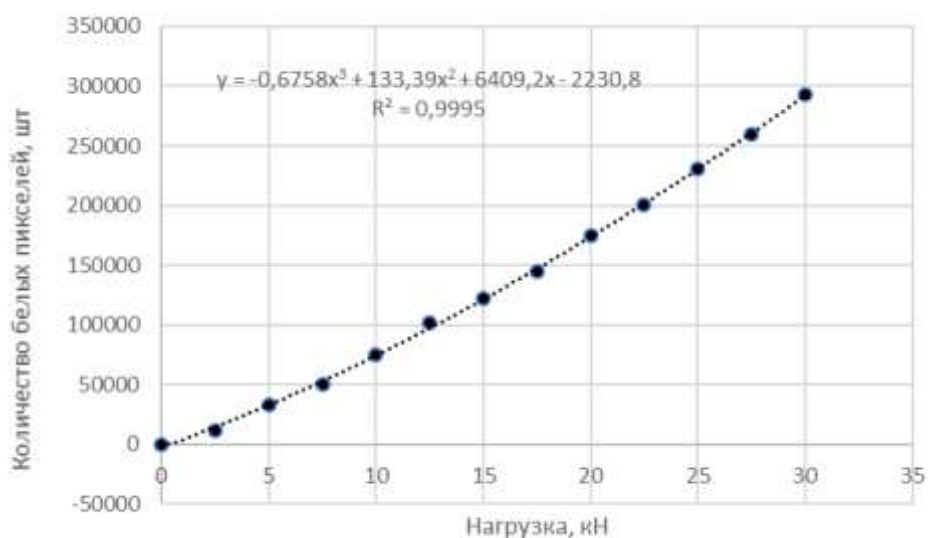


Рисунок 78 – График роста белых пикселей при росте нагрузки на ВОД
Схемные решения по компоновке АПКТК представлены в Приложении 3

4.3 Практическая апробация АПКТК

АПКТК был подготовлен к полевым испытаниям в условиях реальных телекоммуникационных объектов АО «Казахтелеком». Использован четырехканальный АПКТК, к которому были подключены четыре квази-распределённых ВОД и один распределенный. Использовались уже существующие ВОК без всякого рода изменения их назначения. Было выполнено подключение к резервным ОВ, которые не задействованы в процессе передачи информации. Резервные ОВ использовались как квази-распределённые и один распределенный ВОД. Для обеспечения коммутации всех ВОД с оптическими разъемами кросса, блока обработки данных и другого оптического оборудования использовались стандартные оптические коннекторы типа SC. Данные разъемы являются достаточно массовыми и имеют низкую стоимость, при необходимости можно использовать коннекторы другого типа, переход на другие коннекторы не вызывает нарушений работы АПКТК. Оптические коннекторы SC обеспечивают быструю и надежную коммутацию ВОД с оптическим оборудованием ВОЛП, при

этом соединения являются разъёмными, но потери на каждом оптическом коннекторе не должны превышать 0,3 дБ. Если потери будут выше указанного значения, то это вызовет значительное затухание оптического сигнала. Конструктивно АПКТК может быть выполнен в различных вариантах компоновки и количества каналов, это зависит от ситуации и производственной необходимости, а также учитываются различные факторы и условия эксплуатации. Поэтому конфигурация АПКТК выбирается из реальных условий телекоммуникационной сети. Предлагается несколько схем по компоновке АПКТК, они касаются использования на постоянной основе оптического коммутатора и оптического рефлектометра. На рисунке 79 представлена компоновка, которая проходила практическую апробацию, когда оптические модули АПКТК с источником излучения и оптический рефлектометр находились в едином корпусе блока обработки данных.

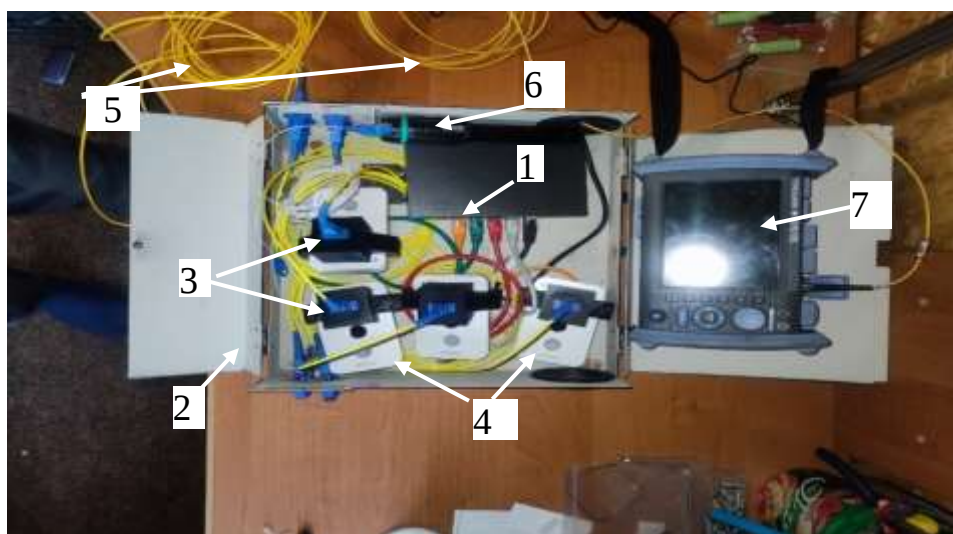


Рисунок 79 – Опытный образец АПКТК

1 – Ethernet коммутатор с модулем связи; 2 – корпус блока обработки данных; 3 – оптический адаптер типа SC; 4 – фотоматрицы и микропроцессоры от IP-камер в едином корпусе (оптический модуль), 5 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 6 – источник излучения.

В приложении Л показан опытный образец блока АПКТК, который был использован при проведении полевых испытаний. В приложении Л представлены структурные схемы лабораторного образца АПКТК и фото прохождения испытаний АПКТК. Акты внедрения представлены в приложении М. Патенты представлены в приложении Н

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. АПКТК и ВОД были откалиброваны при помощи силовоспроизводящей машины МСВ-10МГ-4, которая находится на балансе Национального центра экспертизы и сертификации республиканского государственного предприятия КазСтандарт (Казахстанский институт стандартизации и метрологии).

2. Установлено, что изменение картины пикселей, связанной с изменением цвета пикселей от черного к белому, соответственно рост белых пикселей после проведенного оптико-цифрового анализа негативного изображения светового пятна, прямо пропорционально увеличению нагрузки на ОВ. При силовом внешнем воздействии на ВОД возникает фотоупругий эффект с изменением коэффициента преломления, изменяется интенсивность, фаза распространения световой волны и возникают дополнительные потери оптической мощности, которые можно зафиксировать при помощи фотоприемника имеющего высокое разрешение.

3. Принципиальным отличием предлагаемой методики является проведение оптико-цифрового анализа негативного изображения светового пятна при помощи программы Python, падающего на поверхность фотоматрицы высокого разрешения с последующим анализом изменения картины пикселей в режиме реального времени. Отличием от известных методов оптической интерферометрии и рефлектометрии является конструкция фотоприемного устройства и способа обработки данных, когда используется не один фотодиод, а фотоматрица с высоким разрешением. В отличие от систем, использующих решетки Брэгга, не требуется дорогостоящий оптический анализатор спектра.

4. Сформированное на торце ОВ световое пятно отвечает нормальному распределению Гаусса, имеет высокий уровень шумов, распространяющихся по сердцевине, часть энергии излучения и шумы переходят в оболочку ОВ, которые фиксирует АПКТК. Потери растут при увеличении силы механического воздействия на ОВ. Основным источником шума является сам источник излучения, поэтому он должен иметь высокую степень когерентности, установлено, что отклонения при длине волны 650 нм должны быть не более 5 нм, при росте отклонения нормальная работа АПКТК может быть невозможна.

5. Установлено, что пиксельная картина и форма светового пятна могут меняться в незначительной степени при различной конструкции оптического модуля, в частности, от конструкции оптического волновода. Имеются зависимости от настройки фокусного расстояния от торца ОВ до поверхности фотоматрицы, формы оптического волновода и использованного материала.

6. АПКТК работает с четырьмя квазираспределенными ВОД и выполняет роль системы контроля и сигнализации при изменении НДС и нагрузки на ВОК, для поиска более точного места концентрации механических напряжений, где впоследствии могут образоваться усталостные трещины, используется оптический рефлектометр. С его помощью можно выполнить уточнения дистанции до точки повреждения ВОК.

7. При увеличении длины оптической волны лазера от 650 до 850 нм и балле увеличивает эффективную дистанцию работы ВОД. Это позволит снизить мощность лазера, так как при увеличении дистанции потери возрастут и есть вероятность полного затухания луча. Для ВОД длиной более 40 км необходимо использовать лазер с длиной волны 850 нм и балле или необходимо увеличивать мощность лазера, работающего на волне 650 нм. Увеличение длины оптической волны позволит снизить потери оптической мощности в ОВ. Рекомендуется использовать лазер с длиной волны 650 нм и мощностью 30-50 мВт на дистанции до 30 км. Данный лазер более массовый в производстве и имеет меньшую стоимость.

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. Результаты проведенных исследований показали, что использование метода контроля светопропускания по ОВ позволяет зафиксировать рост дополнительных потерь, которые могут увеличиться при НД, но этот метод не позволяет определить точное место расположения точки внедрения в ВОЛП для съема информации. Разработанный алгоритм автоматизированного многовариантного расчета позволяет установить параметры дополнительных потерь, возникающие в ОВ типа G-652, находящегося в защитной оболочке, что является более объективным критерием оценки реальных условий эксплуатации волоконно-оптических кабелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Кшалова А.А. Основные принципы проектирования, строительства и технической эксплуатации волоконно–оптических линий передач. Учебник (Утвержден МОН РК). – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2014. - 478 с.
2. Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Алдошина О.В., Кшалова А.А. Методы и средства измерения параметров волоконно–оптических линий связи: Учебник (Утвержден МОН РК). – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2014. - 293 с.
3. Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Таткеева Г.Г., Алдошина О.В., Югай В.В. Направляющие системы и волоконно-оптическая техника инфокоммуникаций: Учебник (Утвержден МОН РК). – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2016. - 251 с.
4. Складов О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие для вузов. Изд. 6 изд., стер. 2022. 268 с. ISBN 978-5-8114-9781-2.
5. Волоконно-оптические системы идентификации физических величин: Монография / А Д Мехтиев, В В. Югай, Н. Г. Нешина, А.Д Алькина; Карагандинский технический университет. - Караганда: Изд-во Кар ТУ, 2020.151с. ISBN 078-601-320-272-3.
6. Информационно-измерительные системы: Монография / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Югай В.В, А.Д. Алькина; Карагандинский государственный технический университет - Караганда: Изд - во КарГТУ, 2018. - 228 с.
7. Технологии, средства и принципы измерений на основе интеллектуальных датчиков: Монография / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Югай В.В, Алдошина О.В., А.Д. Алькина. Карагандинский государственный технический университет - Караганда: Изд - во КарГТУ, 2018. - 123 с.
8. Буймистрюк, Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. 2011. No 6 (43). Рр. 38-39. <http://fotonexpres.ru/arhivy/arhivy-nomerov>
9. Буймистрюк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. Control engineering. Россия. 2013. No 3 (45). Рс. 34-40.

10. Окосси Т., Окомото К., Волоконно-оптические датчики Пер. с японского Горбунова Г.Н., Ленинград; Энергоатомиздат, 1991, 255 ст
11. Бусурин В.И., Новсов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. Москва, Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
12. Буймистрюк Г. Я. Информационно–измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем: Монография. СПб : ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. 191ст
13. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Перевод с английского Э.Удда. Москва: Техносфера, 2008. 520 с.
14. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток: Дальнаука, 1999, 286 ст.
15. Замкова Т.В. Проблемы защиты информации в современных информационных системах // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 3. – С. 58-59.
16. Боос А.В., Шухардин О.Н. Анализ проблем обеспечения безопасности информации, передаваемой по оптическим каналам связи, и пути их решения. // Информационное противодействие угрозам терроризма: научн-практ. Журн. / ФГПУ НТЦ, Москва, 2005. № 5. С. 172180.
17. Уктамжонов Ш., Косимов И., Отахужаев Ж.З. Способ защиты информационного сигнала от несанкционированного доступа в ВОЛС, European science. № 3 (45) 2016, С.30-34
18. Кулдашов О.Х. Способ защиты информации в ВОЛС на основе оптического зашумления. Автоматика и программная инженерия. 2018. №4(26). 113-118. <http://www.jurnal.nips.ru>
19. Дудак М.Н. Способы несанкционированного доступа в волоконно-оптических линиях передачи. 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 2020. - 126-127 с.
20. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРарт, 2005. -208 с.

21. А.Д. Алькина, Г.О. Сулейменова Автоматическая система контроля целостности волоконно-оптических кабелей //Материалы международной научно-практической конференции «Сейфуллинские чтения – 18(2): «Наука XXI века – эпоха трансформации» - 2022 .- Т.I, Ч.IV. – С.201-205.
22. Алькина А. Д., Юрченко А. В., Мехтиев А. Д., Мадиев П. Ш., Аймагамбетова Р. Ж. Разработка лабораторного образца системы контроля технического состояния оптических кабелей// ВЕСТНИК ТОГУ. 2023. № 1 (68), С. 71-80
23. <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
24. <https://vols.expert/useful-information/typy-opticheskogo-volokna/>
25. <https://incab.ru/useful-information/optic-cable-and-fiber/characteristics-optical-fiber/>
26. https://lenlasers.ru/manufacturer/inversiya_sensor/
27. <https://all-pribors.ru/opisanie/58572-14-astro-62650>
28. <https://prompermkrai.ru/catalog/materialno-tekhnicheskoe-obespechenie/ooo-inversiya-sensor/>
29. Томишев К. А., Баган В. А., Астапенко В. А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности //ТРУДЫ МФТИ. — 2012. — Том 4. № 2. 64-72
30. Kao C. K., Hockham J. Fiber-dielectric surface waveguides for optical frequencies, Proc. IEE 113 (1966) 7, 1151–1158. DOI : 10,1049 / P1EE.1966.0189.
31. Н. Roggendorf, W. Grond, M. Hurbanic. Glass Sci. Technol. 69 (1996) 7, 216 – 230.
32. S. Nagel. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance, IEEE J. Quantum Electron.18 (1982) 4, 459 – 463.
33. W. A. Gambling. The rise and rise of optical fibers, JSTQE 6 (2000) 6, 1084 - 1089, DOI: 10.1109/2944.902157.
34. L. Skuja, M. Hirano, H. Hosono, K. Kajihara. Defects in oxide glasses, Physica Status Solidi C. 2 (2005) (1), 5–24.

35. X. Wang, A review of the fabrication of optic fiber, Proc. SPIE 6034 (2006), 346-354. DOI: 10.1117/12.668147.
36. A. Argyros. Microstructured polymer optical fibers. Journal of Lightwave Technology 27 (2009) 11, 1571–1579.
37. N. Carlie, L. Petit, K. Richardon. Engineering of glasses for advanced optical fiber applications. J Eng Fiber Fabr 4 (2009) 4, 21–29.
38. Волоконно-оптические датчики давления и система измерения давления. № 2205374, дата публикации 27.05.2003, G01L11/02.
39. Evanescent fiber optic pressure sensor apparatus. Патент США US4360247A, G02F1/0134, 1981.
40. Fiber optic interferometer transducer. Патент США, US4659923A, G01D5/344, 1987.
41. Волоконно-оптический датчик давления. Патент РФ, RU2664684C1, G01L11/02, 2018.
42. Волоконно-оптический датчик давления. Патент РФ, RU2664684C1, G01L11/02, 2018.
43. Волоконно-оптическое устройство контроля давления. Патент РФ, RU203379U1, G01L1/24, 2021.
44. Волоконно-оптический преобразователь деформации. Патент РФ, RU192361U1, G01L1/24, 2019.
45. Method for compensation of fiber optic measurement systems and fiber optic measurement system. Патент США US9562815B2, G01L1/246, 2017.
46. Fiber bragg grating devices utilizing slow light. Патент German, French. EP2259037B1 G01J9/0246, 2015.
47. Fibre optic sensor systems. Патент Великобритания, GB0030289D0. G01D5/35383, 2001.
48. Распределенные оптические датчики давления и температуры. Патент РФ, RU2473874C2, G01K11/3206, 2013.
49. Датчик угла наклона буровой скважины. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 3845. Дата регистрации 05.04.2019.

50. Волоконно-оптический датчик измерения деформации металлических и не металлических поверхностей. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 4218. Дата регистрации 01.08.2019

51. Волоконно-оптический датчик давления. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 5045 Дата регистрации 12.06.2020.

52. Датчик для измерения температуры на основе двухлучевого интерферометра. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 5044. Дата регистрации 12.06.2020.

53. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 5043. Дата регистрации 12.06.2020.

54. Датчик контроля концентрации вещества на основе оптического волокна. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 4708. Дата регистрации 28.02.2020.

55. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 5087. Дата регистрации 26.06.2020.

56. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 6862. Дата выдачи 28.10.2022.

57. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации для предупреждения аварийного разрушения железобетонных конструкций и любых протяженных объектов. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на полезную модель РК № 7775. Дата выдачи 27.01.2023.

58. Автоматизированная волоконно-оптическая система мониторинга, телеметрии и контроля стационарных объектов, водоемов и сейсмоопасных участков. Авторы: Алькина А. Д. и др. Патент на изобретение № 36074. Дата выдачи 27.01.2023.

59. A. Mekhtiev, A. Alkina, A. Neftissov, Is. Kazambayev, L. Kirichenko. Intelligent Systems for Monitoring the Integrity of Technical Objects Based on Distributed Fiber-optic Sensors Information Technology and Implementation (IT&I-2022), November 30 - December 02, 2022.

60. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Монография. СПб.: Изда-во Политехнического университета, Санкт – Петербург, 2007, 110 с.

61. <https://ru.wikipedia.org/wiki>

62. <http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/optichreflec/optichreflec1/>

63. http://laser-portal.ru/content_331

64. Кусаинова К.Т., Кабибулатов А.А., Хамзина Б.Е. Применение волоконных Брегговских решеток. Журнал Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 4 – С. 58-62

65. Численное моделирование волоконной решетки Брэгга в среде Matlab. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2018, том 1

66. R. Hong et al., "Enlarging Dynamic Strain Range in UWFBG Array-Based Ф-OTDR Assisted With Polarization Signal," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 18, pp. 994-997, 15 Sept.15, 2021, doi: 10.1109/LPT.2021.3079186

67. R. Zinsou, Y. Wang, X. Liu, Q. Bai, Y. Wang and B. Jin, "Adaptive Pulse Period Method for Low-Frequency Vibration Sensing With Intensity-Based Phase-Sensitive OTDR Systems," in IEEE Access, vol. 8, pp. 41838-41846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977000.

68. Minardo, A.; Catalano, E.; Coscetta, A.; Zeni, G.; Di Maio, C.; Vassallo, R.; Picarelli, L.; Coviello, R.; Macchia, G.; Zeni, L. Long-Term Monitoring of a Tunnel in a Landslide Prone Area by Brillouin-Based Distributed Optical Fiber Sensors. Sensors 2021, 21, 7032. <https://doi.org/10.3390/s21217032>

69. T. Kumagai, S. Sato and T. Nakamura, "Fiber-optic vibration sensor for physical security system," 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2012, pp. 1171-1174, doi: 10.1109/CMD.2012.6416369.

70. Ковтун А.А., Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Алькина А.Д. Системы охраны периметров на основе волоконно-оптических сенсоров. Научные труды военно-инженерного института радиоэлектроники и связи. № 2 (40), (июнь). 2020. С 25 - 29.

71. Ковтун А.А., Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Алькина А.Д. Импульсно-рефлектометрический метод определения местоположения несанкционированного доступа к волоконно-оптической линии передачи информации // Научные труды военно-инженерного института радиоэлектроники и связи. № 2 (40), (июнь) 2020. С 30 - 37.

72. A. Masoudi, J. A. Pilgrim, T. P. Newson and G. Brambilla, "Subsea Cable Condition Monitoring With Distributed Optical Fiber Vibration Sensor," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1352-1358, 15 Feb.15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2893038.

73. M. Adeel et al., "Impact-Based Feature Extraction Utilizing Differential Signals of Phase-Sensitive OTDR," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 8, pp. 2539-2546, 15 April15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2966413.

74. C. Wang, Y. Shang, W. -A. Zhao, X. -H. Liu, C. Wang and G. -D. Peng, "Investigation and Comparison of varphi OTDR and OTDR-Interferometry via Phase Demodulation," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 1501-1505, 15 Feb.15, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2017.2785358.

75. Z. Sha, H. Feng, Y. Shi, W. Zhang and Z. Zeng, "Phase-Sensitive OTDR With 75-km Single-End Sensing Distance Based on RP-EDF Amplification," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 16, pp. 1308-1311, 15 Aug.15, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2721963.

76. H. Wu, S. Xiao, X. Li, Z. Wang, J. Xu and Y. Rao, "Separation and Determination of the Disturbing Signals in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR)," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 15, pp. 3156-3162, 1 Aug.1, 2015, doi: 10.1109/JLT.2015.2421953.

77. Adeel, M., Tejedor, J., Macias-Guarasa, J., & Lu, C. (2019). Improved Perturbation Detection in Direct Detected ϕ -OTDR Systems using a Novel Match Filtering Approach. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1–1. doi:10.1109/lpt.2019.2940297

78. Wang, P., Lv, Y., Wang, Y., Liu, X., Bai, Q., Zhang, H., & Jin, B. (2020). Adaptability and Anti-noise Capacity Enhancement for OTDR with Deep Learning. *Journal of Lightwave Technology*, 1–1. doi:10.1109/jlt.2020.3016712
79. H. Wu, X. Liu, Y. Xiao and Y. Rao, "A Dynamic Time Sequence Recognition and Knowledge Mining Method Based on the Hidden Markov Models (HMMs) for Pipeline Safety Monitoring With Φ -OTDR," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 19, pp. 4991-5000, 1 Oct.1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2926745.
80. Z. Yang, D. Hong, X. Feng and J. Xie, "A Novel Event Detection Method for OTDR Trace with High Sensitivity Based on Machine Learning," 2021 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC), 2021, pp. 265-269, doi: 10.1109/ICTC51749.2021.9441614.
81. Shi, Y., Wang, Y., Wang, L., Zhao, L., & Fan, Z. (2020). Multi-event classification for Φ -OTDR distributed optical fiber sensing system using deep learning and support vector machine. *Optik*, 221, 165373. doi:10.1016/j.ijleo.2020.165373
82. Peng, Z., Wen, H., Jian, J., Gribok, A., Wang, M., Huang, S., Liu, H., Mao, Z.-H., Chen, K.P. Identifications and classifications of human locomotion using Rayleigh-enhanced distributed fiber acoustic sensors with deep neural networks (2020) *Scientific Reports*, 10 (1), № 21014, DOI: 10.1038/s41598-020-77147-2
83. Shi, Yia;Dai, Shangweia;Liu, Xinyua;Zhang, Yingchaoa;Wu, Xinjiea;Jiang, Taoa. Event recognition method based on dual-augmentation for an Φ -OTDR system with a few training samples. *Journal of Optical Communications and Networking*. May 2022. vol 14, no 5, pp 365 DOI10.1364/OE.468779
84. Abdelli, K., Grieser, H., Tropschug, C., Pachnicke, S. Optical Fiber Fault Detection and Localization in a Noisy OTDR Trace Based on Denoising Convolutional Autoencoder and Bidirectional Long Short-Term Memory (2022) *Journal of Lightwave Technology*, 40 (8), pp. 2254-2264 DOI: 10.1109/JLT.2021.3138268
85. ALi, Y., Zeng, X., Shi, Y. Quickly build a high-precision classifier for Φ -OTDR sensing system based on transfer learning and support vector machine (2022) *Optical Fiber Technology*, 70 № 102868, . DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102868

86. A.D. Mekhtiyev, E.G. Neshina, P. Madi, D.A. Gorokhov. “Automated fiber-optic system for monitoring the stability of the pit quarry mass and dumps,” in *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, vol. 4, 2021, pp. 19-26. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-19-26.

87. A.D. Mekhtiev, A.V. Yurchenko, S.G. Ozhigin, E.G. Neshina, A.D. Al'kina. “Quasi-distributed fiber-optic monitoring system for overlying rock mass pressure on roofs of underground excavations,” in *Journal of Mining Science*, vol. 57 no. 2, pp. 354-360, 2021.

88. A. V. Kulikov. “Fiber-optic perimeter security system on Bragg gratings, as a promising method of monitoring the security of the facility,” in *Polzunovsky Almanac*.no. 2, pp. 274-278, 2010.

89. K. A. Tomyshev, V. A. Bagan, V. A. Astapenko. Distributed fiber-optic pressure sensors for use in the oil and gas industry PROCEEDINGS of MIPT. - 2012. — Volume 4, No. 2, 64-72.

90. C. Lanciano and R. Salvini, “Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1924, Mar. 2020, doi: 10.3390/s20071924.

91. Y. Wang et al., "A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 85821-85837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924736.

92. Eric Udd; William B. Spillman, "The Emergence of Fiber Optic Sensor Technology," in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* , Wiley, 2011, pp.1-8, doi: 10.1002/9781118014103.ch1.

93. L. A. Sánchez, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “Recent Advances in Forward Brillouin Scattering: Sensor Applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 318, Dec. 2022, doi: 10.3390/s23010318.

94. H. Zheng, J. Zhang, N. Guo and T. Zhu, "Distributed Optical Fiber Sensor for Dynamic Measurement," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 3801-3811, 15 June15, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3039812.

95. J. Fu, Y. Guo and P. Li, "A Fiber Bragg Grating Anchor Rod Force Sensor for Accurate Anchoring Force Measuring," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12796-12801, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966235.
96. P. Nagulapally, M. Shamsuddoha, G. Rajan, M. Mohan and B. G. Prusty, "Distributed Fiber Optic Sensor-Based Strain Monitoring of a Riveted Bridge Joint Under Fatigue Loading," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021, Art no. 6009610, doi: 10.1109/TIM.2021.3101324.
97. Y. Wu, Y. Zhang, J. Wu and P. Yuan, "Fiber-Optic Hybrid-Structured Fabry–Perot Interferometer Based On Large Lateral Offset Splicing for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 19, pp. 4311-4315, 1 Oct.1, 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2734062.
98. Y. Dong et al., "Simultaneous Temperature and Strain Sensing Based on M-Shaped Single Mode Fiber," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 22, pp. 1955-1958, 15 Nov.15, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2757933.
99. R. Subramanian, C. Zhu, H. Zhao and H. Li, "Torsion, Strain, and Temperature Sensor Based on Helical Long-Period Fiber Gratings," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 327-330, 15 Feb.15, 2018, doi: 10.1109/LPT.2017.2787157.
100. C. Du, Q. Tang, J. Zhou, X. Guo, T. Yu and X. Wang, "Fiber Optic Sensors Based on Photoacoustic Effect for Rebar Corrosion Measurement," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 11, pp. 4559-4565, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2890318.
101. T. Liu, Y. Wei, G. Song, B. Hu, L. Li, G. Jin, J. Wang, Y. Li, C. Song, Z. Shi, et al. "Fibre optic sensors for coal mine hazard detection," in *Measurement*, vol. 124, pp. 211–223, 2018, doi:10.1016/j.measurement.2018.03.046.
102. F. Ren, W. Zhang, Y. Li, Y. Lan, Y. Xie and W. Dai, "The Temperature Compensation of FBG Sensor for Monitoring the Stress on Hole-Edge," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1-9, Aug. 2018, Art no. 7104309, doi: 10.1109/JPHOT.2018.2858847.

103. 38.T. Li, C. Shi and H. Ren, "A Novel Fiber Bragg Grating Displacement Sensor With a Sub-Micrometer Resolution" in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 14, pp. 1199-1202, 15 July15, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2712602.
104. J. Su, X. Dong and C. Lu, "Property of Bent Few-Mode Fiber and Its Application in Displacement Sensor," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 13, pp. 1387-1390, 1 July1, 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2542366.
105. S.-T. Kim, Y.-S. Park, C.-H. Yoo, S. Shin, and Y.-H. Park, "Analysis of Long-Term Prestress Loss in Prestressed Concrete (PC) Structures Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor-Embedded PC Strands," Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 12153, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112412153.
106. Y.N. Kulchin, O.T. Kamenev, Y.S. Petrov, V.A. Kolchinsky. "Fiber-optic interferometric receivers of weak seismic signals" in Bulletin of the FEB RAS, no. 4, pp. 56-59, 2016
107. А.Д. Мехтиев , А.В. Юрченко, В.А. Калытка, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина, П.Ш. Мадн. Волоконно-оптический длиннобазовый деформометр для системы мониторинга горных пород бортов карьеров. Письма в ЖТФ, 2022. Том 48. Вып. 15, DOI: 10.21883/00000000000
108. J.A. Garcia-Souto, H. Lamela-Rivera. "Comparative analysis of optical-fibre interferometric sensors versus accelerometers: application to vibrations inside high-power transformers," in J. Opt. A: Pure Appl. Opt., vol. 4, pp. 318–326, 2002.
109. S. Kim, Y. Park, S. Park, K. Cho, and J.-R. Cho, "A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces," Sensors, vol. 15, no. 1, pp. 1060–1070, Jan. 2015, doi: 10.3390/s150101060.
110. O.T. Kamenev, Yu.N. Kulchin, Yu.S. Petrov, R.V. Khizhnyak. "Application of the Mach-Zender fiber-optic interferometer for the creation of long-basedeformometers," in Letters to ZTF, vol. 40, no. 3, pp. 49-56, 2014
111. S. Li, S. Ren, S. Chen, and B. Yu, "Improvement of Fiber Bragg Grating Wavelength Demodulation System by Cascading Generative Adversarial Network and Dense Neural Network," Applied Sciences, vol. 12, no. 18, p. 9031, Sep. 2022, doi: 10.3390/app12189031.

112. R. Zinsou, Y. Wang, X. Liu, Q. Bai, Y. Wang and B. Jin, "Adaptive Pulse Period Method for Low-Frequency Vibration Sensing With Intensity-Based Phase-Sensitive OTDR Systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 41838-41846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977000.
113. Y. Sun, X. Li, C. Ren, H. Xu and A. Han. Distributed Fiber Optic Sensing and Data Processing of Axial Loaded Precast Piles. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 169136-169145, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023626>.
114. H. Wu et al., "Real-Time Denoising of Brillouin Optical Time Domain Analyzer With High Data Fidelity Using Convolutional Neural Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 11, pp. 2648-2653, 1 June1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2876909.
115. A. Mekhtiyev, Y. Neshina, A. Kozhas, B. Aubakirova, R. Aimagambetova, S. Toleubayeva, A. Tleubayeva. "Monitoring Reinforced Concrete Building Structure Technical Conditions Based On The Use Of Quasi-Distributed Fiber-Optic Sensors", In *International Journal Of Geomate*, vol. 23, no. 97, pp. 154–162, Sep. 2022.
116. Liu, T., Wei, Y., Song, G., Li, Y., Wang, J., Ning, Y., Lu, Y. Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications. *Pro-ceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*, 2013. Pp. 102-111.
117. Yiming, Z., Nong Z. and Guang-yao Si. A fiber bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining. *Sensors (Switzerland)*. 2016. Vol. 16. No.10. Pp. 112-117. DOI: 10.3390/s16101759. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5087543/>
118. Jonas, H. Osório, et al. Simplifying the Design of Microstructured Optical Fibre Pressure Sensors. *Scientific Reports*. 2017. No7. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-03206-w>
119. Zhao, Z., Zhang, Y., Li, C., Wan, Z., Li, Y., Wang, K., Xu, J. Monitoring of coal mine roadway roof separation based on fiber Bragg grating displacement sensors. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. No74, Pp. 128-132.

120. Bin, T., Hua, C. Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Surrounding Rock Deformation Control of TBM-Excavated Coal Mine Roadway. *Journal of Sensors*. New York. 2018. 2018:8010746. DOI:10.1155/2018/8010746
121. A. Shadab, S. K. Raghuwanshi and S. Kumar, Advances in Micro-Fabricated Fiber Bragg Grating for Detection of Physical, Chemical, and Biological Parameters—A Review, *IEEE Sens. J.* Vol. 22, Pp. 15650-15660, 2022.. DOI:10.1109/JSEN.2022.3188813
122. Yang, L., Li, C., Luo, C., Thermal Strain Detection for Concrete Structure Cold Shrinkage under Stress Constraint with FBG., *Sensors.*, 2022., 22(24), 9660. <https://doi.org/10.3390/s22249660>
123. Pereira, L., Mesquita, E., Alberto, N., Melo, J., Marques, C., Antunes, P., André, P.S., Varum, H. Fiber Bragg Grating Sensors for Reinforcing Bar Slippage Detection and Bond-Slip Gradient Characterization (2022) *Sensors*, 22 (22), 8866, DOI: 10.3390/s22228866
124. Banda, P., Tamin, M.D., Meyer, J. Applied Quasi-Distributed Fibre Bragg Grating Strain Sensors in Structural Damage Sensing of a Bridge Structure (2022) *SAIEE Africa Research Journal*, 113 (2), Pp. 75-87 DOI: 10.23919/SAIEE.2022.9785541
125. Guillen Bonilla, Guillen Bonilla, Rodríguez Betancourt, Casillas Zamora, Sánchez Morales, Gildo Ortiz, & Guillen Bonilla. (2019). Signal Analysis, Signal Demodulation and Numerical Simulation of a Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor Based on FDM/WDM Techniques and Fabry-Pérot Interferometers. *Sensors*, 19(8), 1759. doi:10.3390/s19081759
126. Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2017). Application study of embedded Rayleigh based Distributed Optical Fiber Sensors in concrete beams. *Procedia Engineering*, 199, 2014–2019. doi:10.1016/j.proeng.2017.09.466
127. Berrocal, C. G., Fernandez, I., Bado, M. F., Casas, J. R., & Rempling, R. (2021). Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete

beams by distributed optical fibre sensing. *Structural Health Monitoring*, 20(6), Pp 3309 - 3326. doi:10.1177/1475921720984431

128. Bertulesi, M., Bignami, D.F., Boschini, I., Brunero, M., Ferrario, M., Menduni, G., Morosi, J., Paganone, E.J., Zambrini, F. Monitoring Strategic Hydraulic Infrastructures by Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors (2022) *Water (Switzerland)*, 14 (2), art № 188, . DOI: 10.3390/w14020188

129. Becks, H., Baktheer, A., Marx, S., Classen, M., Hegger, J., Chudoba, R. Monitoring concept for the propagation of compressive fatigue in externally prestressed concrete beams using digital image correlation and fiber optic sensors (2023) *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 46 (2), pp. 514-526. DOI: 10.1111/ffe.13881

130. Hoult, R., Bertholet, A., de Almeida, J.P. Core versus Surface Sensors for Reinforced Concrete Structures: A Comparison of Fiber-Optic Strain Sensing to Conventional Instrumentation (2023) *Sensors*, 23 (3), статья № 1745. DOI: 10.3390/s23031745

131. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Пер. с английского Э.Удда. Москва, техносфера, 2008, 520 ст.

132. Ю.Н. Кульчин. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток, Дальнаука, 1999, 286 ст

133. Иоргачев Д.В. Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. учебное пособие. ЭКО-ТРЕНДЗ. Москва, 2002, 276 стр.

134. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н., Дураев В.П. Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и новые перспективы. Издательство: Техносфера, 2010 г. <https://www.labirint.ru/books/939569/>

135. Цуканов В. Н., Яковлев М. Я. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. Издание 5-е |. Издательство Инфра-Инженерия. Москва. 2022. 300 ст

136. Angelo Catalano, Francesco Antonio Bruno, Carlo Galliano, Marco Pisco, Giovanni Vito Persiano, Antonello Cutolo, Andrea Cusano. An optical fiber intrusion

detection system for railway security // Sensors and Actuators A: Physical Volume 253, 2017 Pages 91-100 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.026>

137. Xin Liu, Baoquan Jin, Qing Bai, Yu Wang, Dong Wang and Yuncai Wang. Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection // Physics Sensors (Basel, Switzerland), 2016

138. Li, X.; Sun, Q.; Wo, J.; Zhang, M.; Liu, D. Hybrid TDM/WDM-Based Fiber-Optic Sensor Network for Perimeter Intrusion Detection. J. Lightwave Technol. 2012, 30, 1113–1120

139. Ю.А. Русанов Технологии «Ворон™» для охраны периметров аэропортов. "Транспортная безопасность и технологии" №2 (33) 2013.

140. А. В. Куликов Волоконно-оптическая система охраны периметра на брэгговских решетках, как перспективный метод мониторинга безопасности объекта // Ползуновский альманах. - 2010. - № 2. - С. 274-278

141. Ковтун А.А., Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Алькина А.Д. Системы охраны периметров на основе волоконно-оптических сенсоров. Научные труды военно-инженерного института радиоэлектроники и связи. № 2 (40), (июнь) 2020. С 25 - 29.

142. А.Д. Мехтиев, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина, В.В. Югай Разработка схем системы охраны периметров распределённого типа на основе волоконно-оптических технологий Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей № 4 (92) 2020. С 18 - 24.

143. Куликов А. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы безопасности журнал. - №4, 2010, с. 56-61.

144. Petar Bašić, Rudolf Halmetschlager. Fibre optic sensors based on hollow capillary tube with three tightly encapsulated optical fibres. //Automatika, 60:4, 368-377, DOI: 10.1080/00051144.2019.1617516

145. Анищенко Н.С. Волоконно-оптические датчики деформации. //международная научно-практическая конференция СибГУТИ, 2017.

146. Методология и методы научных исследований в экономике и менеджменте. Пособие для вузов / Завьялова Н.Б., Головина А.Н., Завьялов Д.В.,

Дьяконова Л.П., Мельников М.С. и др.; под ред. Н. Б. Завьяловой, А.Н. Головиной. Москва- Екатеринбург: 2014. – 282 с.

147. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Учебное пособие - 2-е изд. перераб. и доп.- Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.

148. Методология научных исследований: методические рекомендации / сост. Т.М. Яркова; М-во с.-х. РФ, федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высшего образования «Пермский гос. аграрно-технолог. университет им. акад. Д.Н. Прянишникова», каф организации производства и предпринимательства в АПК. – Пермь: ИПЦ «ПрокростЪ», 2018. –63 с.

149. Теоретические основы и практика научных исследований : учеб. пособие / Н. Г. Эйсмонт, В. В. Даньшина, С. В. Бирюков ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018.

150. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Изд. стереотип. URSS. 2021. 272 с. ISBN 978-5-9519-2161-1.

151. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. Изд. стереотип. URSS. 2021. 454 с. ISBN 978-5-9519-2349-3.

152. Система автоматизированных расчетов Comsol [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е. Н. Буркова, А. Н. Кондрашов, К. А. Рыбкин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. – 9,88 Мб; 133 с

153. <https://www.comsol.ru/documentation>

154. <https://www.wolframalpha.com/>

155. Ермеков М. А., Махов А. А. Статистико–детерминированный метод построения многомерных моделей с использованием ЭВМ. – Караганда, 2001. –70 с.

156. Венцель, Е.С., Овчаров, Л.А. Теория вероятностей и инженерные приложения. М., «Наука», 1998.

159. Alkina, A.D. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long / A.V.

Yurchenko, N.I. Gorlov, A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun // IOP Science. Journal of Physics. — 2016. — V. 671. — Pp. 1-5.

160. 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).

161. 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

162. 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

163. Alkina, A. Design of an information-measuring system for monitoring deformation and displacement of rock massif layers based on fiber-optic sensors/ Yugay, V., Mekhtiyev, A., Neshina, Y. Aubakirova, B., Aimagambetova, R., Kozhas, A., Musagazhinov, M., Kovtun, A. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6 (5 (114)), 2021. Pp. 12–27. (Scopus 48) doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244897>.

164. 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

165. A. Alkina. Development of an Automatic System for Monitoring the Integrity of Power Cables Using Quasi-Distributed Fiber-Optic Sensors. A. Mekhtiev, Al. Neftissov, I. Kazambayev, La. Kirichenko // Information Technology and Implementation (IT&I-2022), November 30 - December 02, 2022. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)

166. A. Alkina. Intelligent Systems for Monitoring the Integrity of Technical Objects Based on Distributed Fiber-optic Sensors. A. Mekhtiev, Al. Neftissov, I. Kazambayev, La. Kirichenko // Information Technology and Implementation (IT&I-2022), November 30 - December 02, 2022. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)

167. <https://vols.expert/useful-information/ustroistvo-opticheskogo-kabelya/>

168. D. Alkina. A Fiber-Optic Long-Base Deformometer for a System for Monitoring Rocks on the Sides of Quarries / A. D. Mekhtiyev, , A. V. Yurchenko, V. A. Kalytka, Y. G. Neshina A. and P. Sh. Madi // Technical Physics Letters. 2022, Vol. 48, No. 15, pp. 30–32.

169. 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, 571-574

170. W. A. Gambling: The rise and rise of optical fibers, JSTQE 6 (2000) 6, pp.1084 -1089, DOI: 10.1109/2944.902157

171. Сыркин В. Г.: CVD-метод. Химическое парофазное осаждение. 2000, Москва, Наука, pp. 482.

172. S. Nagel: An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance, IEEE J. Quantum Electron.18 (1982) 4, pp.459 - 463

173. В.А. Бурде: Методы и средства локализации дефектов волокна в строительных длинах оптического кабеля, Вестник связи, 7 (2010), pp.19-21.

174. A. Dhar: The mechanism of rare earth incorporation in solution doping process, Opt. Express 16 (2008) 17, pp. 12835-12846

175. Argyros A. Microstructured polymer optical fibers. Journal of Lightwave Technology 27 (2009) 11, pp.1571–1579

176. X. Wang: A review of the fabrication of optic fiber, Proc. SPIE 6034 (2006), pp. 346-354. DOI: 10.1117/12.668147

177. Carlie N, Petit L, Richardon K Engineering of glasses for advanced optical fiber applications. J Eng Fiber Fabr 4 (2009) (4), pp. 21–29

178. Пестриков В.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций /

Профес-сия, 2002. – 320 с.

179. Alkina, A. Studying additional losses of standard G.652 optical fiber with protective cladding 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

180. 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).

181. A. Alkina/ The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunicationsfiber optic cables under operating conditions / F. Bulatbayev, Ye. Neshina, E. Siemens, T. Shaigarayeva // Proc. of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAИТ), March 2018

182. <https://5kif4a.github.io/losses-calculation/>.

183. А.Д. Мехтиев, А.В. Юрченко, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина Использование оптического волок на G-652 для контроля горного массива угольных шахт. Вестник ЮУрГУ. №1, 2020. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». DOI: 10.14529/ctcr200114

184. А.Д. Мехтиев, А. И. Солдатов Е. Г. Нешина А. Д. Алькина П.Ш. Мадн Обеспечение безопасности горных работ с использованием волоконно-оптической системы. ВЕСТНИК ТОГУ. 2021 № 1 (60).

185. А.Д. Мехтиев, А. И. Солдатов Е. Г. Нешина А. Д. Алькина Волоконно-оптическая система контроля геотехнических параметров горной выработки. Омский научный вестник №1 (175) 2021. С. 64-68. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-64-68

186. П. Ш. Мадн, А. Д. Алькина, А. В. Юрченко, А. Д. Мехтиев, Р. Ж. Аймагамбетова. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров. ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК № 4 (184) 2022. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-112-117

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

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

189. А.Д. Алькина. Автоматическая система контроля целостности волоконно-оптических кабелей / Р. Ж. Аймагамбетова, Юрченко А.В. А.Д. Мехтиев, Мадип.Ш. Мир измерений 2 / 2023

190. <https://skomplekt.com/tovar/1/1/112/>

191. <https://skomplekt.com/tovar/1/1/9398073346/>

192. <http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/imprefl/imprefl2/>

193. <https://skeo.ru/katalog/kio/reflektometry-otdr/yokogawa-aq1200>

194. А.Д. Мехтиев, А.В. Юрченко, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина Использование оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт. Вестник ЮУрГУ. №1, 2020. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». DOI: 10.14529/ctcr200114

195. А.Д. Мехтиев, А. И. Солдатов Е. Г. Нешина А. Д. Алькина П.Ш. Мадип.Ш. Обеспечение безопасности горных работ с использованием волоконно-оптической системы. ВЕСТНИК ТОГУ. 2021 № 1 (60).

196. А.Д. Мехтиев, А. И. Солдатов Е. Г. Нешина А. Д. Алькина Волоконно-оптическая система контроля геотехнических параметров горной выработки. Омский научный вестник №1 (175) 2021. С. 64-68. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-64-68

197. П. Ш. Мадип.Ш., А. Д. Алькина, А. В. Юрченко, А. Д. Мехтиев, Р. Ж. Аймагамбетова. Волоконно-оптическая система контроля устойчивости бортов карьеров. Омский научный вестник № 4 (184) 2022. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-112-117

198. A.V. Yurchenko F.N. Bulatbaev, E.G. Neshina, A.D. Al'kina. The Model of a

Fiber-Optic Sensor for Monitoring Mechanical Stresses in Mine Workings. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54(7), 528–533.

199. A.D. Alkina. Improving the method of controlling the stress-strain state of steel structures of electromechanical systems / A.B. Zhantlessova, S.K. Zhumazhanov, T.B. Akimzhanov, Y.Zh. Sarsikeev, B.B. Issabekova, Zh.B. Issabekov, A.D. Mekhtiyev // Metalurgija 62 (2023) 2, 303-305

200. Е.Г. Нешина, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Д. Алькина, П.Ш. Мадид. Разработка датчика контроля смещения бортов карьеров. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2 (458) 2023.

201. 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.

202. A.D. Alkina. Developing a sensor for controlling the pit wall displacement / Y.G. Neshina , A.D. Mekhtiyev, V.V. Yugay, P.Sh. Madi // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES ISSN 2224-5278 Volume 2, Number 458 (2023), 160–167 <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.291>

203. Alkina A.D. The working roof rock massif displacement control system Mekhtiyev A.D., Soldatov A., Neshina Y.G., Madi P.Sh. // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences Volume 5, Number 449 (2021), 68-76, 160–167 <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.100>

204. Alkina, A. A Quasi-Distributed Fiber-Optical Monitoring System for Movement of Roof Strata in Mines / Mekhtiev, AD; Sarsikeev, EZ; Neshina, EG // JOURNAL OF MINING SCIENCE. Том58 2022 Выпуск 2, С 338-346 DOI10.1134/S1062739122020168

205. Al'kina A.D. Quasi-distributed fiber-optic monitoring system for overlying rock mass pressure on roofs of underground excavations. / Mekhtiev A.D., Yurchenko

A.V., Ozhigin S.G., Neshina E.G., // Journal of Mining Science, 57(2), 2021, pp. 354-360

206. 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

207. 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

208. 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

209. 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.

210. 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

211. 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), 2020. С 30 - 37.

212. А. Д. Алькина. Исследование волоконно-оптического датчика смещения / П. Ш. Мадии, 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, Томск, 09–11 ноября 2021 года, С. 152-155.

213. А. Д. Алькина 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, Екатеринбург, 26–28 июня 2019 года, 2019. – С. 42.

214. 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.

215. Алькина АД. Исследование волоконно-оптических датчиков смещения / Мади П.Ш., Мехтиев А.Д. // Международная научно-теоретическая конференции «Современная аграрная наука: цифровая трансформация», Секция - Актуальные проблемы растениеводства и применение цифровых технологий. 2021. – С.92-95.

216. A. D. Alkina. 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

217. Kovtun A.A., Mekhtiyev A.J., Alkina A. D., Iskineyeva A.S. Investigation of additional losses of fiber-optic conductors of type G-652 that occur during bending. Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина № 4(111), 169-175. doi.org/ 10.51452/kazatu.2021.4(111).789.

218. A.D. Alkina. Hardware-software complex for identification of rock displacement in pits / Y.G. Neshina , A.D. Mekhtiyev , P.A. Dunayev , Z.D. Manbetova // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES Volume 3, Number 459 (2023), 180–192 <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.308>

Приложение А

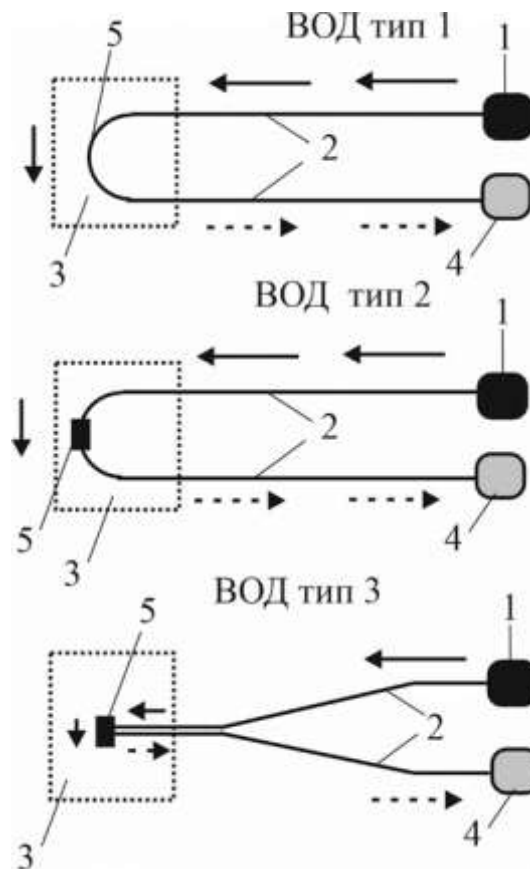


Рисунок 1А - Три группы ВОД

1 – полупроводниковый лазер или LED диод; 2 – волокно; 3 – контролируемый объект (деформация, смещение и др.); 4 – фотодиод или фотоматрица; 5 – сенсор

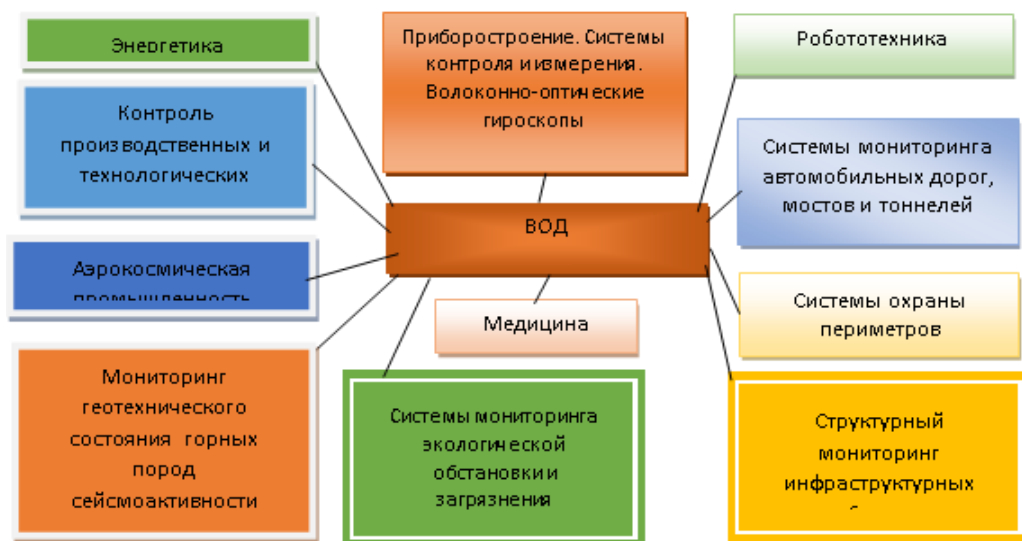


Рисунок 2А - Области промышленного применения ВОД

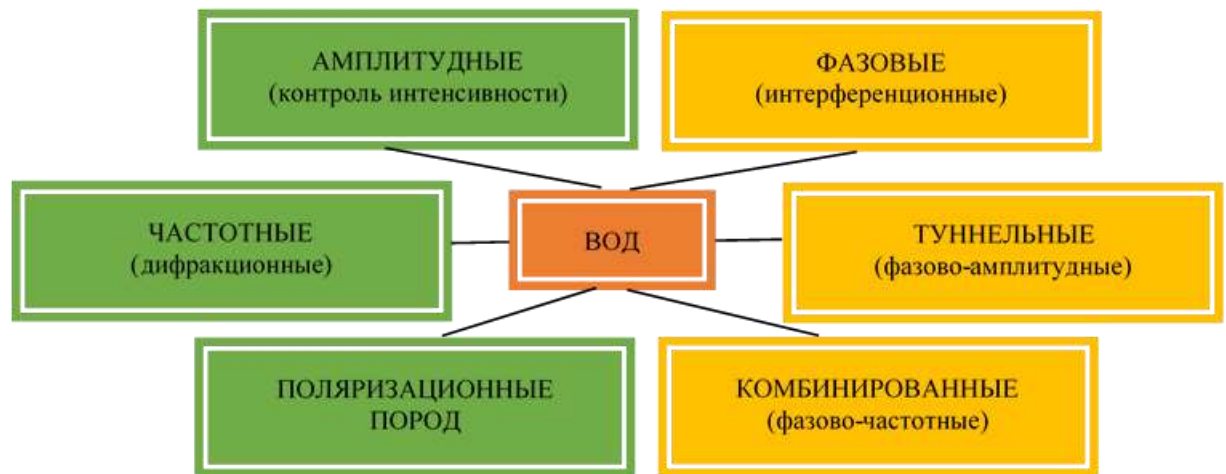


Рисунок 3А - Классификация ВОД



Рисунок 4А - Применение ВОД в промышленности

Приложение Б

Данное приложение посвящено рассмотрению характеристик оптического волокна, которое используется для создания ВОД. Также необходимо выяснить, какие показатели преломления будут использованы, это в первую очередь касается профиля ОВ, так как на его торце формируется профиль пятна луча света от источника, который падает на поверхность фоточувствительной пластины. Данный раздел основан на сведениях, полученных из источников [5, 131-135], для выбора показателей преломления и параметров ОВ были использованы источники [1-4], на основании полученной информации из данных источников был создан рисунок 1Б, на котором показан график снижения уровня затухания оптического сигнала в ОВ при увеличении длины оптической волны.

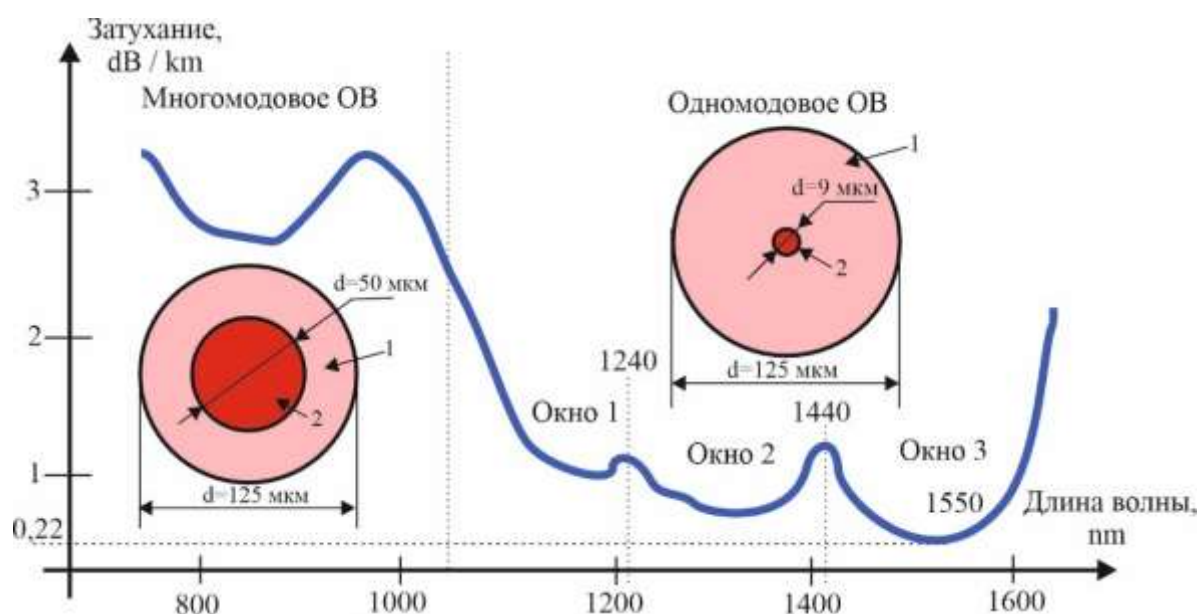


Рисунок 1Б - График снижения уровня затухания оптического сигнала в ОВ при увеличении длины оптической волны

1 -оболочка ОВ, 2 – сердцевина ОВ

Из источников [5, 131-135] были также получены достаточно важные сведения для формирования формы и параметров светового пятна, а также

изменения его интенсивности при нагрузке на ОВ, которые вызывают изменение параметров преломления.

Далее нужно рассмотреть еще одну характеристику ОВ, которая будет учтена при создании ВОД. Для лучшего понимания отличий в профиле многомодового и одномодового ОВ, подготовлены рисунки 2Б и 3Б. Черными, зелеными и красными стрелками показана траектория движения мод в многомодовом ОВ, показаны траектории движения нескольких мод. Это ОВ стандарта G651, как сказано ранее, оно не будет использовано по многим причинам, но главная причина – это отсутствие оптических кабелей в системах телекоммуникации, построенных на основе многомодовых ОВ. Многомодовое ОВ имеет ступенчатый профиль и более большую по диаметру сердцевину, чем у одномодового ОВ. Данное ОВ рассматривается для сравнения с одномодовым ОВ стандарта G652, которое будет использовано в дальнейшем для построения ВОД [5, 131-135].

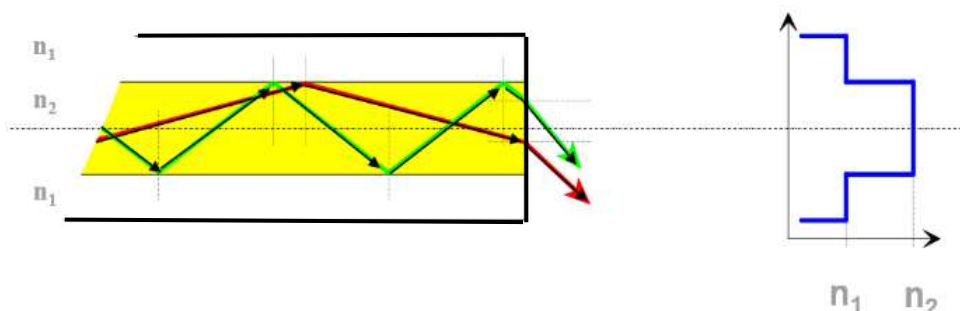


Рисунок 2Б - Ступенчатый профиль многомодового ОВ стандарта G651

При необходимости можно рассчитать число одновременно проходящих мод по сердцевине ОВ, если принять численность входной апертуры $NA = 0,2$, то при условии, что многомодовое ОВ стандарта G651 имеет диаметр сердцевины, равный $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$, тогда при использовании лазера с длиной волны диапазона $\lambda = 850 \text{ nm}$, что типично для данного типа волокна, число мод будет равно значению $M=680$. Для волны $\lambda = 1300 \text{ nm}$ числовой показатель апертуры будет равен $NA = 0,2$, при том же диаметре сердцевины, число мод будет значительно

уменьшено до 292. Расчет числа одновременно проходящих мод по сердцевине ОВ произведен при помощи известного выражения [5, 131-135].

$$M = 0,5x(\pi_x d_x NA / \lambda)^2.$$

Что касается характеристик одномодового ОВ стандарта G652, а также других, более высоких, имеет принципиальное отличие от стандарта G651, так как диаметр его сердцевины значительно меньше и равен 9 μm . У многомодового ОВ диаметр сердцевины составляет $d = 50 \mu\text{m}$ или более редкий вариант 62 μm (не применяется в системах телекоммуникации). Нужно отметить, что диаметры оболочки ОВ стандарта G651 и G652 идентичные и составляют 125 μm [5, 131-135]. Одномодовое ОВ способно пропускать только одну моду, но при этом имеет лучшие параметры по полному внутреннему отражению и низкий коэффициент затухания, что позволяет распространять оптический сигнал без проблем на 100 и более километров. На рисунке 3Б представлен ступенчатый профиль одномодового ОВ стандартов G652 и выше, но более высокие стандарты не применяются для внутризоновых систем телекоммуникации.

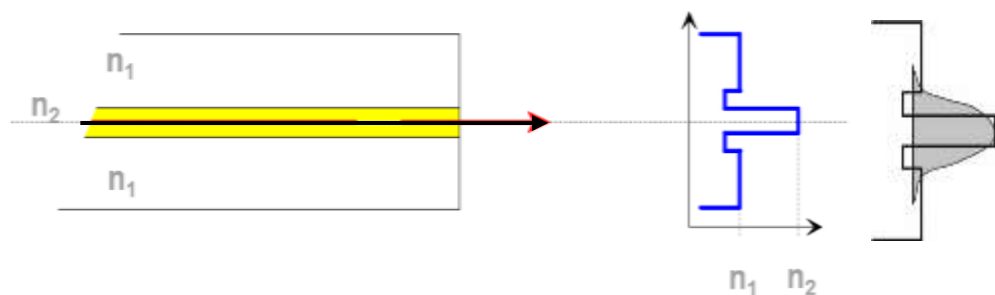


Рисунок 3Б - Ступенчатый профиль одномодового ОВ стандарта G652 [5, 131-135]

Примем для дальнейшего моделирования и расчетов ОВ стандарта G652 с коэффициентом преломления для оболочки $n_1 = 1.4570$ и для сердцевины $n_2 = 1.4625$. Данные коэффициенты могут отличаться в зависимости от стандарта и фирмы производителя, но в очень малом диапазоне. Численную апертуру

одномодового ОВ со ступенчатым профилем можно рассчитать по известному по выражению [5, 131-135]

$$NA = \sin \Theta = (n_2^2 - n_1^2)^{0,5} = \lambda / \pi w_0,$$

где w_0 - потери оптической мощности

Принят следующий параметр апертуры одномодового ОВ, который равен $NA = 0,17$ при $\Theta = 9.8^\circ$.

Стандарт G652 является наиболее массовым в производстве и имеет достаточно невысокую стоимость в сравнении со своими аналогами. Сформированное на торце одномодового ОВ световое пятно описывается законом нормального распределения Гаусса [5, 131-135]. Этот ступенчатый профиль одномодового ОВ использован при моделировании и проведении эмпирических исследований светового пятна.

ВОД основывается на использовании стандартного кварцевого ОВ, находящегося в модуле стандартного телекоммуникационного оптического кабеля. На рисунке 4Б представлен один из вариантов конструкции оптического кабеля. В зависимости от условий прокладки оптический кабель может иметь броню или дополнительные силовые элементы. Диаметр ОВ в защитном акриловом покрытии может иметь диаметр 248 – 250 мкм. Предлагаемый АПКТК и ВОД можно использовать не только для внутризоновых сетей телекоммуникации, но и для местных и внутриобъектных ВОЛП, так как они используют одинаковые оптические кабели с ОВ стандарта G652 или G65, которые идентичны по своим параметрам. Предлагаемый АПКТК и ВОД предназначен для контроля технического состояния подземных, воздушных и подводных ВОК. Конструкция оптических кабелей различна и зависит от назначения кабеля, необходимую информацию можно получить из источников [5,131-135, 167].

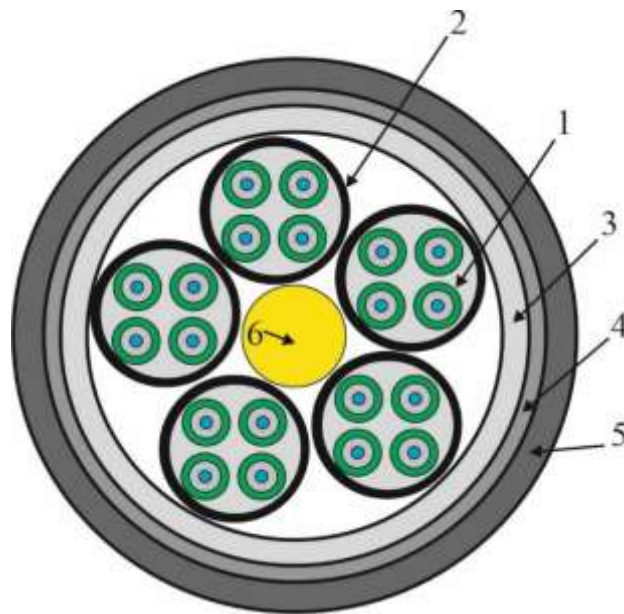


Рисунок 4Б – Конструкция оптического кабеля

1 –ОВ в защитной оболочке, 2 – оболочка модуля, 3 – защитная внутренняя оболочка, 4 – защитная броня, 5 – внешняя защитная оболочка, 6 – армировка или силовой элемент (кевларовые или синтетические нити)

ВОД находится внутри оптического модуля и использует резервные оптические ОВ. Конструкция ВОК представлена на рисунке 5Б.

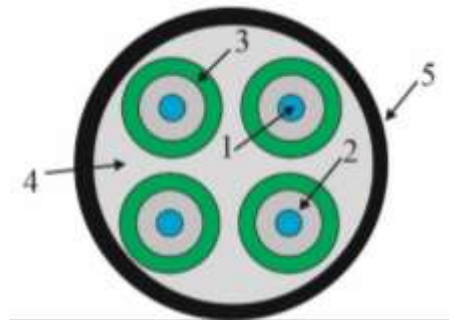


Рисунок 5Б – Конструкция оптического модуля

1 – сердцевина ОВ диаметром 9 мкм, 2 – оболочка ОВ диаметром 125 мкм, 3 – защитное акриловое или виниловое или легированное покрытие диаметром 242-250 мкм, 4 – наполнитель или буфер (гель или воздух), 5 – пластиковая оболочка трубки модуля.

Приложение В

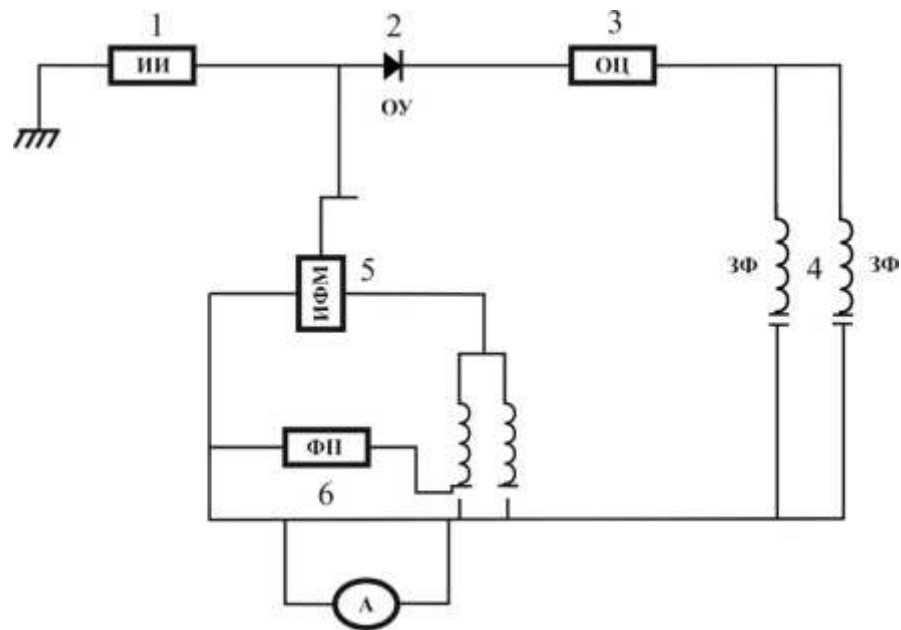


Рисунок 1В - Условная схема установки для измерения оптических шумов в ОВЛП

Дифференциальное уравнение для расчета распределения интенсивности (плотности оптического сигнала) по радиальной компоненте (толщине) слоя оптоволокна:

$$\frac{dI}{dr} + AI = 0. \quad (1)$$

В (1) константа имеет смысл релаксационного параметра с размерностью соответствующей волновому вектору

$$A \approx \frac{1}{L},$$

где L – линейный параметр системы.

С учетом граничного условия $I(0) = I_0 = I_{\max}$, из (1) имеем

$$I(r) = I_0 e^{-Ar}. \quad (2)$$

Моделируем рабочий элемент рассматриваемой оптоэлектронной системы как трехслойный оптоволоконный проводник светового сигнала.

В первом слое (ядре) оптоволоконного кабеля, ввиду условия

$Ar \gg 1$, расчет интенсивности оптического сигнала проводим приближенно $I = \frac{\Phi}{S}$, где Φ - мощность входного оптического сигнала [Вт]; $S = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения «ядра» кабеля, [мкм]. Тогда, в области $0 \leq r \leq r_1$ принимаем $I_0 = \frac{\Phi}{S}$.

Во втором слое (оболочке) оптоволоконного кабеля, в области

$r_1 \leq r \leq r_2$, дифференциальное уравнение для расчета распределения интенсивности оптического сигнала

$$\frac{dI_1}{dr} + BI_1 = AI_0, \quad (3)$$

с учетом граничного условия $I_1(r_1) = I_0$, принимает вид

$$I_1 = I_0 \left[\left(1 - \frac{A}{B}\right) e^{-B(r-r_1)} + \frac{A}{B} \right]. \quad (4)$$

Уравнение интенсивности можно записать в форме

$$I_1(r) = I_0 \left[e^{-B(r-r_1)} + \frac{A}{B} (1 - e^{-B(r-r_1)}) \right]. \quad (5)$$

В третьем слое (воздухе), в области $r \geq r_2$, дифференциальное уравнение распределения интенсивности оптического сигнала

$$\frac{dI_2}{dr} + DI_2 = 0, \quad (6)$$

с учетом граничного условия $I_2(r_2) = I_1(r_2)$, имеет решение

$$I_2 = I_1(r_2) e^{-D(r-r_2)}. \quad (7)$$

$$\text{В (7) } I_1(r_2) = I_0 \left[e^{-B(r_2-r_1)} + \frac{A}{B} (1 - e^{-B(r_2-r_1)}) \right].$$

Константы в решениях (6), (7)

$$B \approx k_1, [\text{м}^{-1}] \Rightarrow B \approx \frac{2\pi}{\lambda_1};$$

$$D \approx k_2, [\text{м}^{-1}] \Rightarrow D \approx \frac{2\pi}{\lambda_2}$$

$$A \ll B;$$

$$D > B.$$

Результатом численного решения математической модели является график зависимости изменения параметра интенсивности световой волны, распространяющейся по сердцевине ОВ, от расстояния от центра ОВ.

Для понимания процесса сначала рассмотрим известную теорию оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера, это одна из вариаций оптического двухлучевого интерферометра Жамена, предложенного ранее. Были изучены научные работы отечественных и зарубежных ученых [128-135], в данных источниках можно найти подробную информацию о принципах работы и конструкции оптического двухлучевого интерферометра Маха-Цендера и других видов интерферометров. Источники относятся к разным временным диапазонам и имеют свой подход к описанию. Также информацию об оптических интерферометрах можно найти в открытых источниках. В дальнейшем для раскрытия теоретических основ работы оптического двухлучевого интерферометра будет использовано для математическое моделирование [160]. Недостатки использования интерферометра Маха-Цендера представлены в статье [137], авторы предлагают свой вариант ВОД для контроля смещения горных пород карьера.

По условию разность фаз выражается следующим образом [137]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{н}} + \Delta\varphi(t),$$

где $\Delta\varphi_{\text{н}}$ – первичное значение фазы распространения оптической волны;

$\Delta\varphi(t)$ – значение фазы при внешнем силовом воздействии на ОВ.

Если на ОВ оказать механическое воздействие и сформировать микроизгиб, то изменится значение фазы $\Delta\varphi(t)$, это является основным принципом измерения. Из источников [128-137] получены сведения о двухлучевом оптическом интерферометре Маха-Цендера, который используется для построения волоконно-оптических датчиков, но использовать его для контроля технического

состояния ВОК невозможно по причине генерации высокого уровня температурных помех [128-137]. При изменении внешней температуры вокруг ОВ происходят изменения длины ОВ, это вызывает смену параметра Δn и изменение фазы распространения световой волны. Для измерительной системы это вызовет сбой в настройке или можно сказать смещение нуля на шкале измерения, что приведет к ошибке в измерениях. Показания на шкале прибора будут изменяться, но в реальности изменений нагрузки на фундамент не будет. Можно найти информацию, что многомодовое волокно менее чувствительное к изменению температуры, но, учитывая значительные потери и ограниченность дистанции в 500 метров, оно исключается из данной работы, так как протяженность измерительных каналов будет более одного километра [128-137]. Для контроля протяженных объектов и железобетонных конструкций будет использовано одномодовое ОВ стандарта G.652. Это потребует разработки аппаратно-программного комплекса использующего алгоритмы искусственного интеллекта для отсеивания помех. Изменение температуры окружающей среды даже на 1°C , вызовет нарушение работы системы контроля, так как произойдут изменения Δn и $\Delta \varphi$ [160].

Приложение Г

Для расчета численных значений сопротивления разрушению для материала ОВ, в случае, когда в ОВ имеются трещины можно использовать известную теорию упругости [178], которая рассматривает процессы распределения механических напряжений около эллиптического отверстия при растяжении в полосе максимальных механических напряжений на большой полуоси эллипса [178]. Расчет можно начать с распределения напряжений у вершины трещины:

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2\sqrt{l/\rho}), \text{ МПа}, \quad (1)$$

при малом радиусе в вершине трещины,

$$\sigma_{\max} = 2\sigma\sqrt{l/\rho}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение, Па;

σ – действующее напряжение, Па;

l – длина трещины, м;

ρ – радиус полуоси эллипса, м.

Расчетная схема представлена на рисунке 1Г [178]

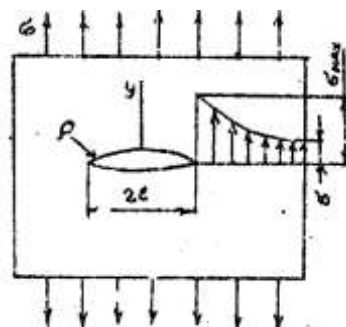


Рисунок 1Г – Расчетная схема

Представленный ниже результат истинен только в случае упругого деформирования, так как Гриффитс [178] рассматривал хрупкие твердые тела,

которые имеют большую часть деформации в упругой зоне, до их разрушения. Рассмотрим случай, когда сформировано плоское напряженное состояние (НДС)

$$W(\sigma, l) = 2\pi\sigma^2 l^2 / 2E, \quad (3)$$

где $W(\sigma, l)$ – энергия упругого деформирования, возникающего в результате существования трещины при действии на тело напряжений, σ ;

l – длина трещины, м;

E – модуль упругости, Па.

Из известной теории Гриффитса можно установить, что «Энергетическое условие для разрушения твердого тела при самопроизвольном и неконтролируемом росте трещин, а также заданном значении механических напряжений при условии $\sigma = \sigma_c$ является достаточным для роста длины трещины с величиной энергии P и не увеличивалось в деформируемом теле». Предельные или критические значения НДС при значении механических напряжения σ_c , когда в ОБ имеются условная трещина длиной $2l$, удовлетворяет равенству [178]

$$\partial P / \partial l = \partial [U(l) - W(\sigma_c, l)] / \partial l = 0. \quad (4)$$

Правая часть соотношений (3) и (4) будет постоянной величиной для расчетного материала ОБ, которая представлена через K_c .

$$\sigma_c \sqrt{\pi l} = K_c \quad \sigma_c \sqrt{\pi l} = K_c / \sqrt{\pi l} \quad (5)$$

Приложение Д

Результаты анализа распределения НДС по ВОК. Выполнен расчет НДС по зонам возникновения от середины к краю ВОК. ВОК разделен на три зоны НДС, где отмечены свои значения НДС (рисунок 1Д), на ОВ действовал металлический стержень, который вызывал микроизгиб.

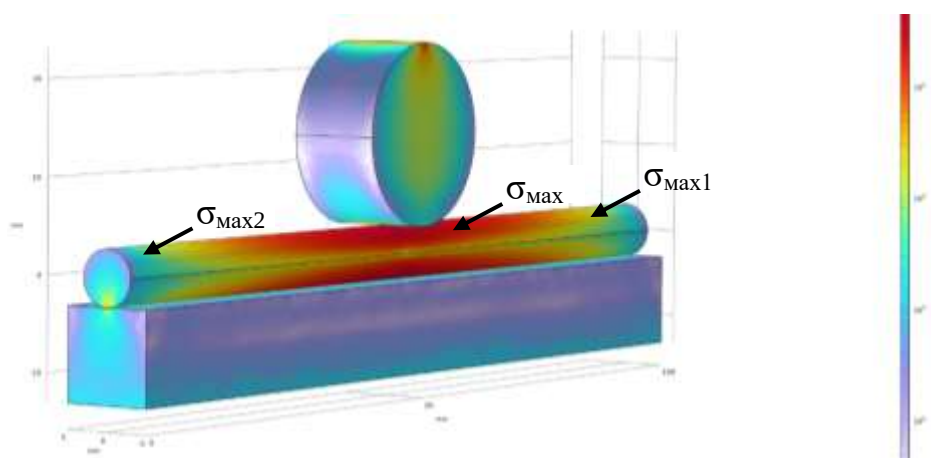


Рисунок 1 Д – Разделение ВОК на 3 основные зоны концентрации механических напряжений

На основании полученных данных можно выполнить расчет НДС по зонам, указанным на рисунке. Были сделаны расчеты НДС, сформированного в ОВ при приложении нагрузки и формировании микроизгиба после приложения нагрузки. Далее представлены выражения, по которым были рассчитаны численные значения максимальных напряжений $\sigma_{\max}$, в зависимости от значения приложенной нагрузки $P_{\text{раб}}$. Математическая функция имеет вид $\sigma_{\max} = F(P_{\text{раб}})$.

$$\sigma_{\max} = F(P_{\text{раб}}),$$

$$\sigma_{\max} = P_{\text{раб}} / 0,303, \text{ Н},$$

где $P_{\text{раб}}$ – значение приложенной нагрузки, Н.

$$\text{СКО}\% = 0,01. \text{ Коэффициент Фишера } F = 1723 \cdot 10^{20}.$$

Далее было составлено выражение для расчета значения НДС в зоне 1 $\sigma_{\max 1}$ в зависимости от значений приложенной нагрузки $P_{\text{раб}}$. Математическая функция имеет вид $\sigma_{\max 1} = F(P_{\text{раб}})$.

$$\sigma_{\max 1} = F(P_{\text{раб}}),$$

$$\sigma_{\max 1} = P_{\text{раб}} / (0,67567 + 8,36165 \cdot 10^{-21} \cdot P_{\text{раб}}), \text{ Н},$$

где $P_{\text{раб}}$ – значение приложенного давления, Па.

$$\text{СКО}\% = 0,15. \text{ Коэффициент Фишера } F = 3560,9514 \cdot 10^{20}.$$

Далее было составлено выражение для расчета значения НДС в зоне 2 $\sigma_{\max 2}$ в зависимости от значений приложенной нагрузки $P_{\text{раб}}$. Математическая функция имеет вид $\sigma_{\max 2} = F(P_{\text{раб}})$.

$$\sigma_{\max 2} = F(P_{\text{раб}})$$

$$\sigma_{\max 2} = P_{\text{раб}} / 0,45045, \text{ Н},$$

где $P_{\text{раб}}$ – значение приложенного давления Н.

Последним этапом было составление выражения для расчета параметров деформации для ОВ, которое выразим через $\varepsilon_{\max}$. Выражение устанавливает зависимость $\varepsilon_{\max}$ от давления $P_{\text{раб}}$. Математическая функция имеет вид $\varepsilon_{\max} = F(P_{\text{раб}})$.

$$\varepsilon_{\max} = 4,93 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{раб}},$$

где $P_{\text{раб}}$ – значение приложенного давления, Н.

$$\text{СКО } \% = 0,4.$$

Выполнена имитация разрыва ОВ и расхождение торцов ОВ внутри оптического модуля ВОК. Торцы ОВ, расходясь на определенном расстоянии еще способны частично и в малой мере передавать оптическое излучение от лазера в сторону фотоприемника, который может зафиксировать его удлинение и затем разрыв. Моделирование показало, что чем дальше торцы ОВ находятся друг от друга внутри оптического модуля, тем выше дополнительные потери. Результаты моделирования в программе COMCOL. То же касается, когда растет нагрузка на ОВ (на боковую грань), дополнительные потери растут (рисунок 2Д).

Программа Comsol Multiphysics 6.1 модуль Wave optics. Модель исследования прохождения световой волны между торцами оптоволокна разделенным воздушным зазором.

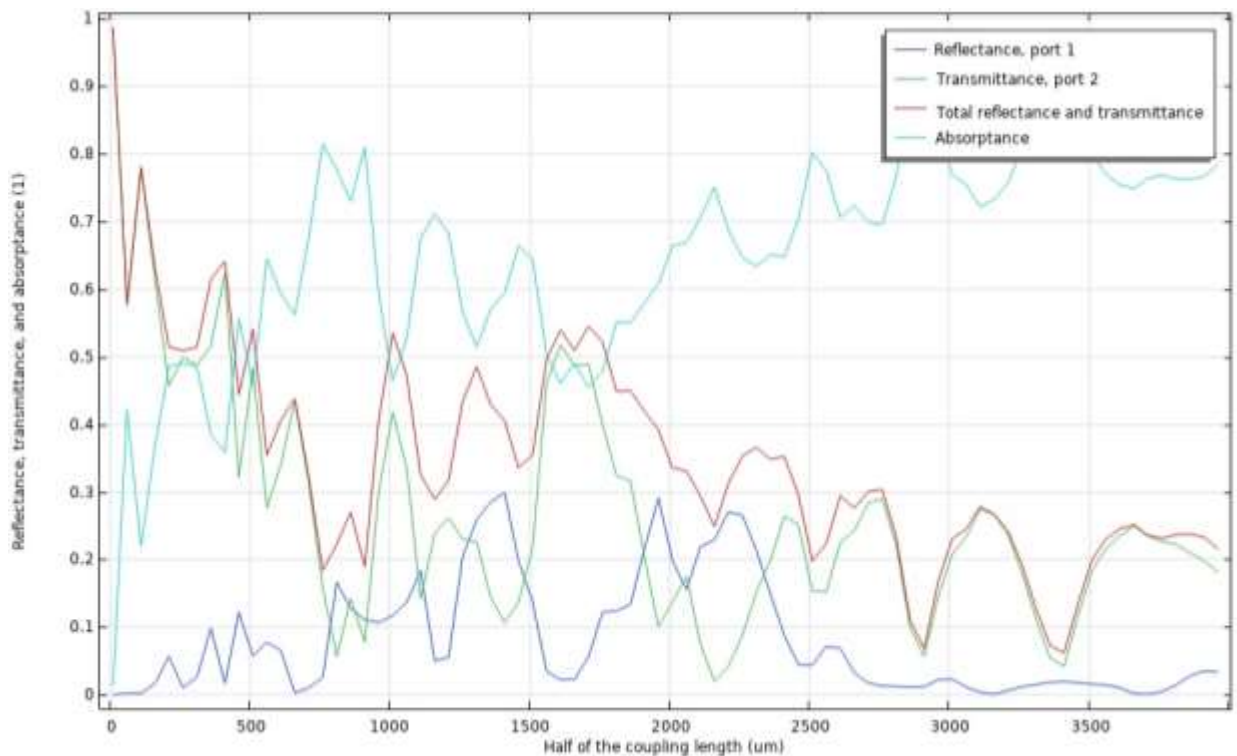


Рисунок 2Д – Результаты моделирования в программе COMCOL

Стационарное положение начальное на 20 микрон, тангенциальные моды электрического нормированного поля на плоскости портов входа и выхода. Электрическое поле, как показано на цветовой шкале от синего до красного, показывают значение V/m в данной области. На рисунках 3Д и 4Д промоделированы разрыв и расхождение торцов ОВ внутри оптического модуля, можно наблюдать потерю части световой волны, а значит рост дополнительных потерь при разрыве ОВ.

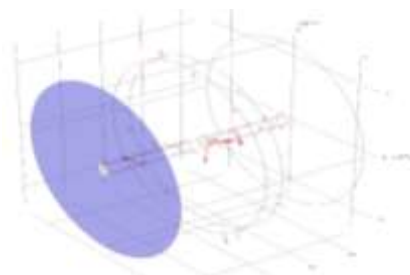


Рисунок 3Д – Расчетная модель

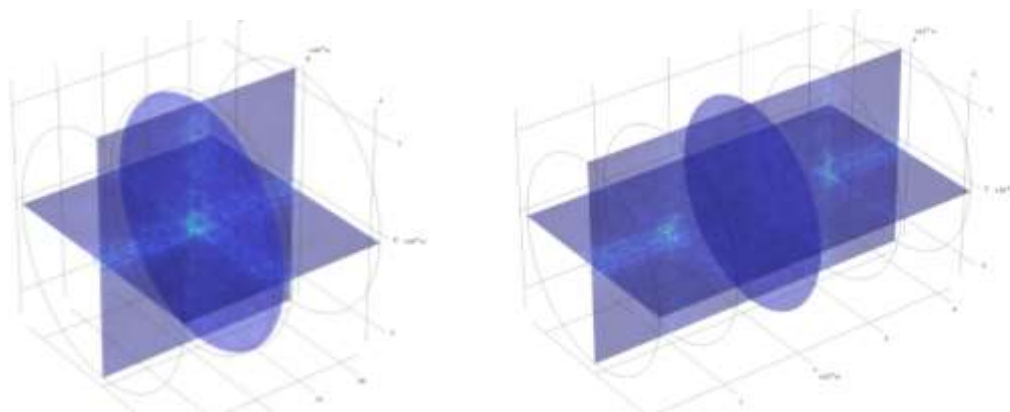


Рисунок 4Д – Моделирование разрыва ОВ

Алгоритм моделирования представлен в Приложении В, рисунок 1В, также представлена трехмерная компьютерная модель ВОК (рисунок 5Д), созданная в программе COMCOL.

Результатом моделирования являются два графика НДС. На рисунке 6Д представлен первый график, который отражает рост параметра деформации ОВ. Деформация обозначена индексом ε , рост нагрузки изменялся с шагом, равным 1 Мпа. Нагрузка передавалась ОВ через металлические стержни.

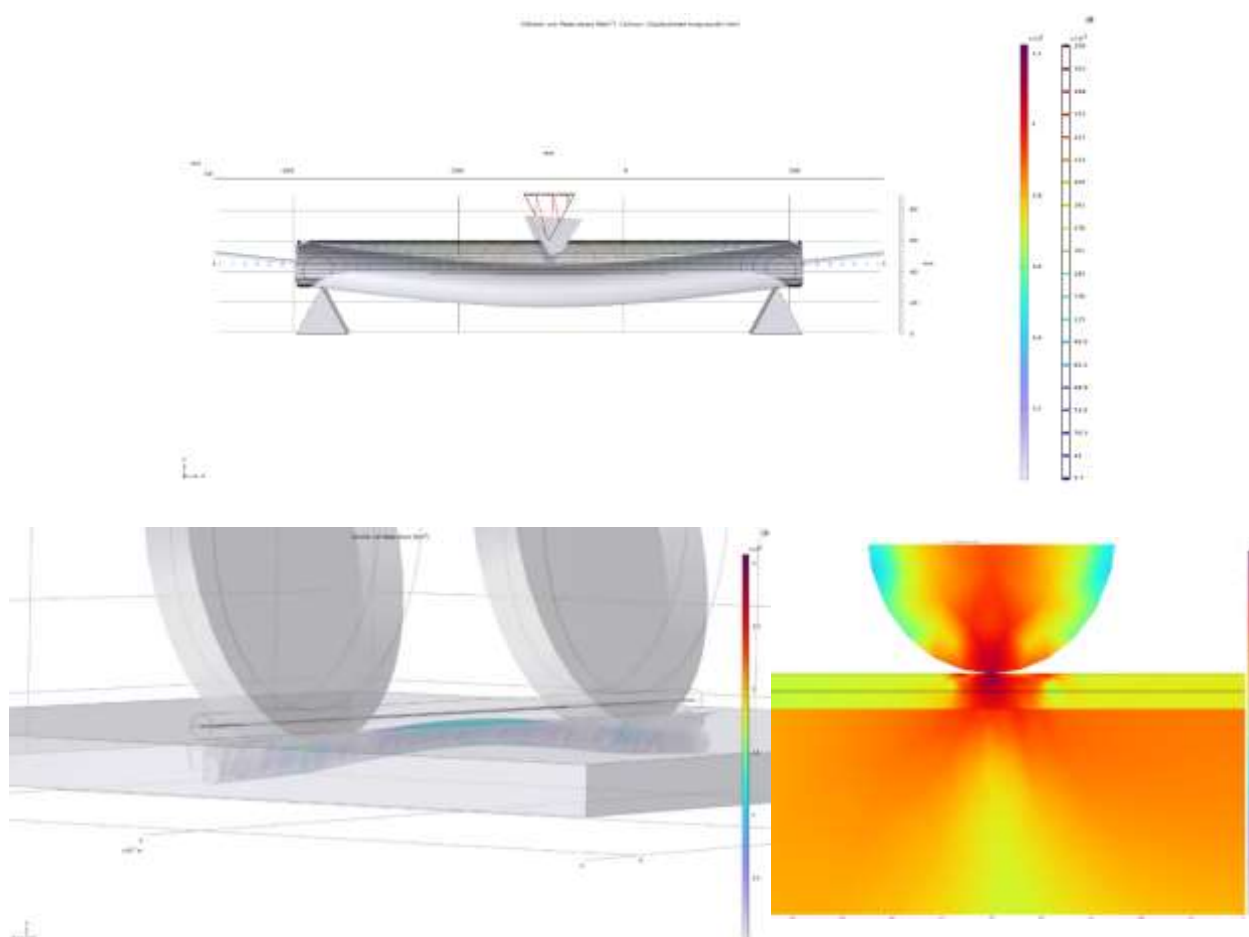


Рисунок 5Д - Трехмерная компьютерная модель ВОК

Использованные аппроксимации полученных показателей деформации ε при пошаговом увеличении нагрузки P .

1. $\varepsilon = 0,000018951P^4 - 0,000472288 P^3 + 0,0032662 P^2 + 0,0165598 P - 0,00127462$ (quart);

2. $\varepsilon = -0,0000932673 P^3 + 0,000897319 P^2 + 0,0212976 P - 0,00263909$ (cub);

3. $\varepsilon = -0,00050169 P^2 + 0,0266324 P - 0,00599671$ (quad).

Оценка качества построения аппроксимации по выбранным критериям представлена в Таблице 1Д.

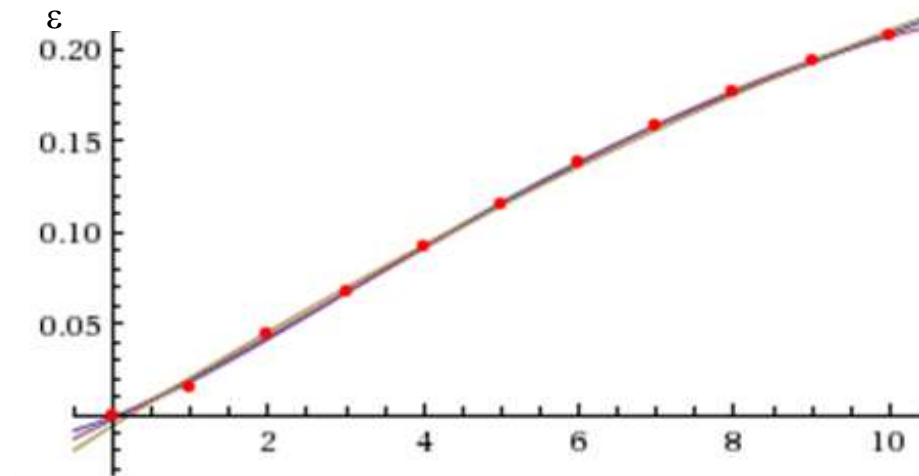


Рисунок 6Д – Рост ε в ОВ при увеличении нагрузки

Таблица 1Д - Результаты аппроксимации.

Аппроксимация	AIC	BIC	R2	Adjusted R2
quartic	–100,704	–98,3164	0,999263	0,999263
cubic	–97,2166	–95,2271	0,998959	0,998959
quadratic	–89,4635	–87,872	0,998232	0,99779

На рисунке 7Д представлен второй график, который отражает рост параметра механических напряжений ОВ. Механические напряжения обозначены индексом σ , рост нагрузки изменялся с шагом, равным 1 МПа. Нагрузка передавалась ОВ через металлические стержни.

Зависимость значений механических напряжений σ представлена математической моделью с различными видами аппроксимации;

1. $\sigma = -0,0000240938 P^4 + 0,000456012 P^3 - 0,00244265 P^2 + 0,0255543 P + 0,000477972$ (quartic);
2. $\sigma = -0,0000258644 P^3 + 0,000569073 P^2 + 0,0195308 P - 0,00221273$ (cubic);
3. $\sigma = 0,000181107 P^2 + 0,02101103 P + 0,00128161$ (quadratic).

Значения критериев для оценки качества аппроксимации представлены в таблице 2Д.

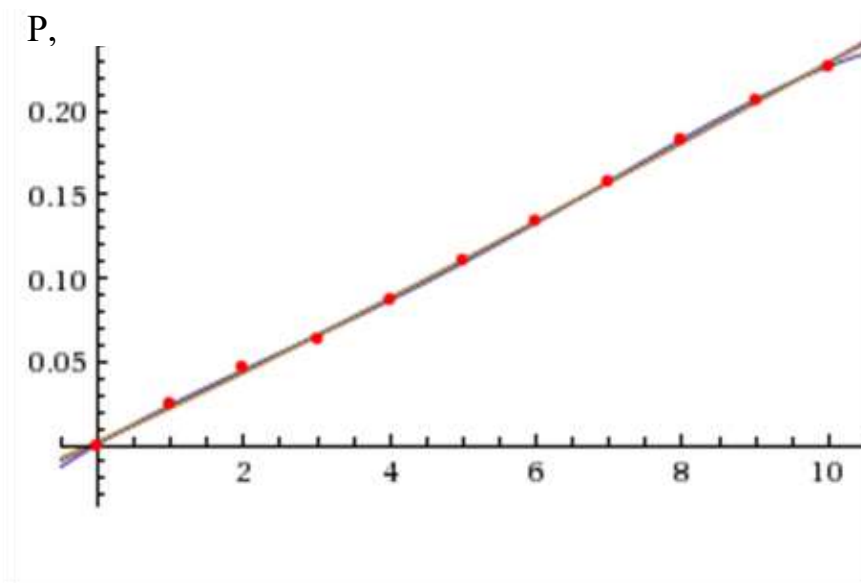


Рисунок 7Д - Рост механических напряжений σ оптического волокна при пошаговом увеличении нагрузки

Таблица 2Д - Результаты аппроксимации

Аппро- ксимация	AIC	BIC	R2	Adjusted R2
quartic	−105,216	−102,829	0,999735	0,999559
cubic	−97,7032	−96,1117	0,999247	0,999058
quadratic	−96,809	−94,8195	0,999319	0,999027

Приложение Е

Выбранный для моделирования метод конечных элементов является эффективным и численным методом решения широкого круга краевых задач механики сплошной среды [150 -153]. Его основой является замена объекта некой совокупностью конечного числа условных дискретных элементов, которые связаны между собой в установленных узлах. Данный подход обеспечивает перемещение внутри элементов простейшими функциями. Нужно сформировать граничные условия и рассмотреть твердое тело с произвольными границами и получить матрицу жесткости объекта, связывающие напряжения, в случае перемещения узлов элемента. При обеспечении непрерывности перемещений между элементами обеспечивается сходимость метода при увеличении количества конечных элементов (МКЭ) [150 -153]. Выполнено разбиение области и выбор типа конечного элемента моделирования, что влияет на эффективность расчета, так как ошибка в выборе параметров конечного элемента может выдать ошибку в 300 % и более. Были использованы квадратичные двумерные четырехугольные элементы (рисунок 1Е а) при решении плоских задач. Для решения трехмерных задач применяются квадратичные изопараметрические тетраэдральные и прямоугольные элементы (рисунок 1Е б, в).

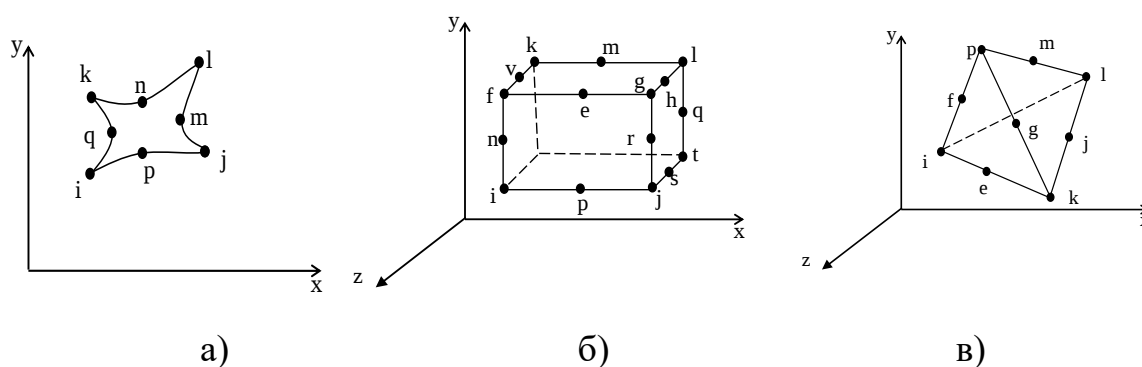


Рисунок 1Е – Квадратичные элементы

- а) квадратичный двумерный б) квадратичный тетраэдральный изопараметрический
в) квадратичный прямоугольный изопараметрический

Важным моментом являлось достижение адекватной конечно-элементной модели (КЭМ), состоящей из узлов и элементов [150-153].

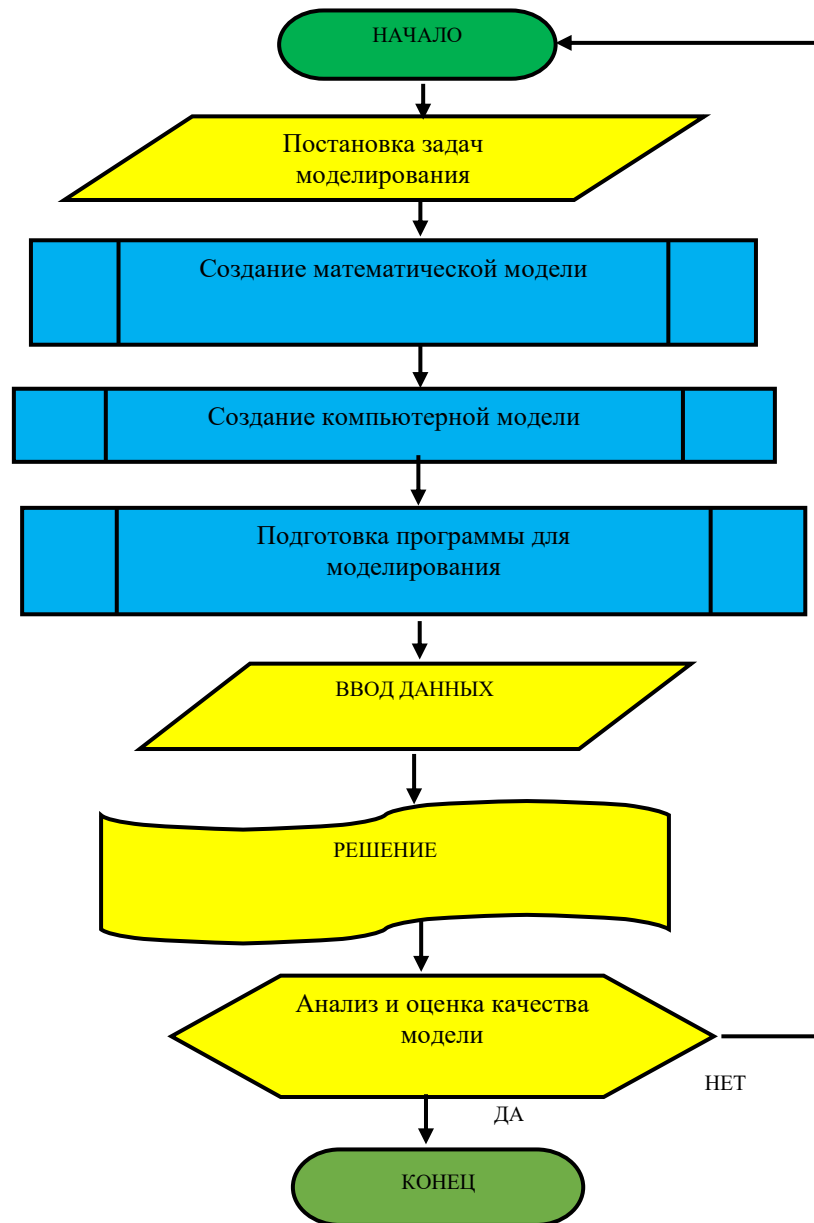


Рисунок 2Е - Алгоритм моделирования

Приложение Ж

Дополнительные потери, связанные с изгибом ОВ - это наиболее частый вид потерь, типичный для эксплуатации ВОК(ОВ). Потери растут при изгибе (микроизгибе) ОВ на больших длинах волн, что ограничивает диапазон пропускания световой волны. Наибольшие потери в оптическом волокне вызывают изгибы с малым или критическим радиусом, если число изгибов более одного. Изгиб ОВ вызывает не только рост потерь, но и может стать причиной повреждений ОВ, которые могут вызвать рост затухания световой волны. Установлено, что ОВ на больших длинах волн имеет меньшие потери так как уровень рассеяния меньше, но при этом ОВ на больших длинах волн имеет большие потери при изгибе ОВ.

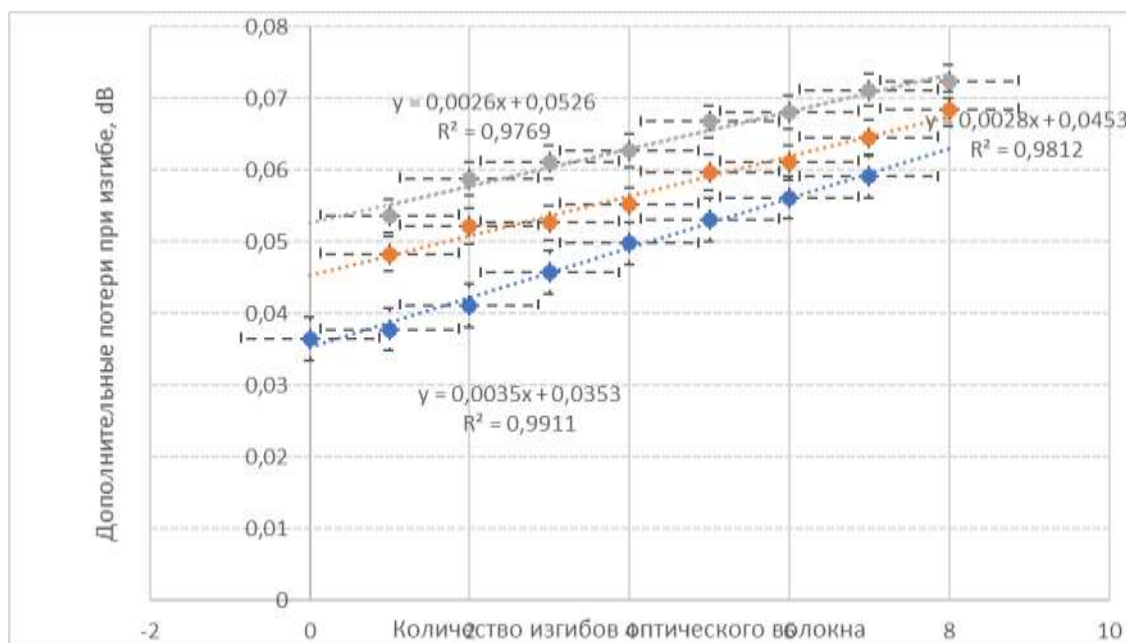


Рисунок 1Ж – График зависимости роста дополнительных оптических потерь при увеличении количества изгибов ОВ для волн 1310, 1550, 1625 нм (угол изгиба 45°)

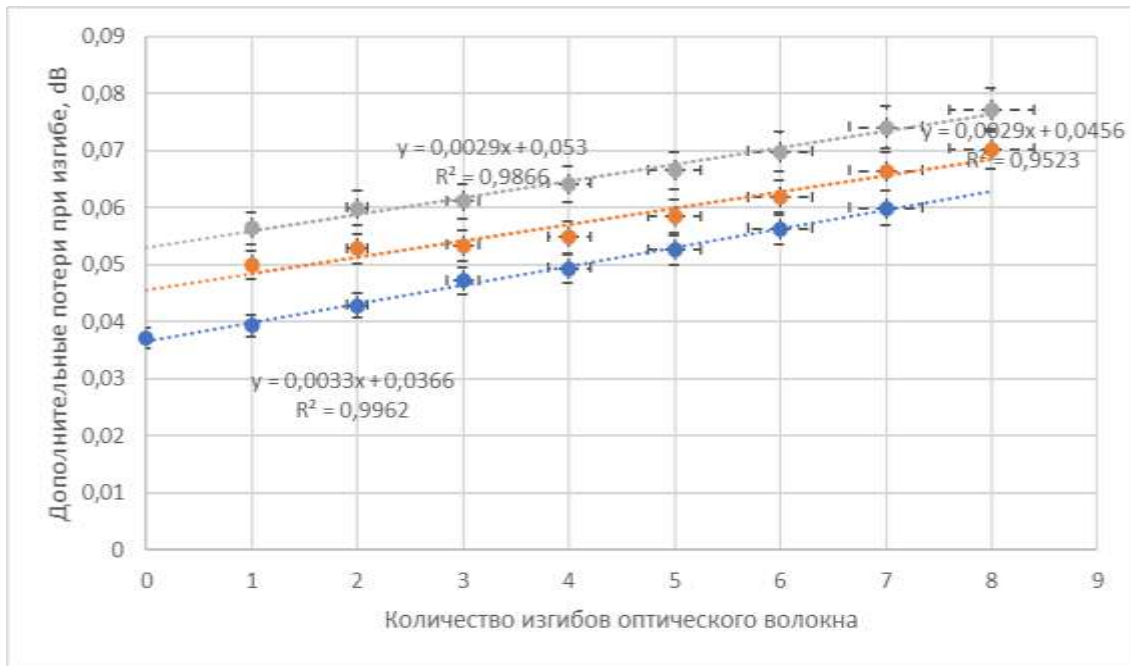


Рисунок 2Ж - График зависимости роста дополнительных оптических потерь при увеличении количества изгибов ОВ для волн 1310, 1550, 1625 нм (угол изгиба 90°)

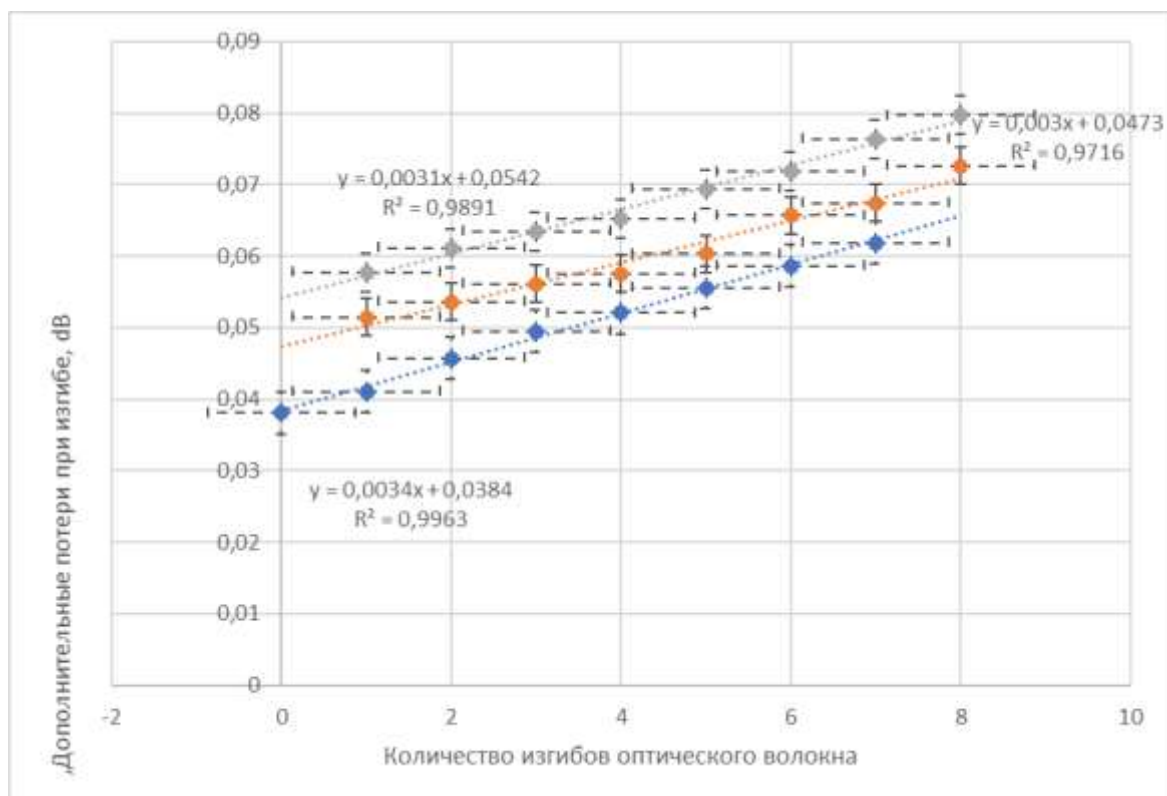


Рисунок 3Ж - График зависимости роста дополнительных оптических потерь при увеличении количества изгибов ОВ для волн 1310, 1550, 1625 нм (угол изгиба 135°)

Моделирование дополнительных потерь, сформированных в ОВ в случае микроизгиба, вызванного механической нагрузкой, выполнено с использованием компьютерной программы. Программа ведет расчет дополнительных потерь при изгибе ОВ в 7 точках на заданный угол. Если есть необходимость, то число изгибов в расчетной схеме можно увеличить до 21 [179,180]. Также имеется публикация автора по теме диссертации, где были исследованы потери оптического излучения при изгибе ОВ, которое находится внутри оптического телекоммуникационного кабеля различных марок [181]. Результаты теоретических и эмпирических исследований легли в основу создания программы для моделирования, также указанные результаты были опубликованы ранее в статьях [179-181]. С программой можно ознакомиться на сайте, программа находится в свободном доступе [182]. Результатом расчета является выдача численных значений дополнительных потерь и автоматическое построение линейной аппроксимации с линией тренда и выполняет регрессионный анализ полученных результатов. На рисунке 4Ж представлено главное окно интерфейса программы для численного моделирования дополнительных потерь, вызывающих затухание оптического сигнала при длине волны 1310 -1625 нм. Можно задействовать уже имеющиеся табличные данные, полученные при эмпирических исследованиях, но есть вариант, который позволяет внести собственные данные в ручном режиме.

Закон, по которому строится график, является линейным и функцией $f(x) = a * x + b$. Также необходимо задать значение X, коэффициенты A и B. При использовании режима «Табличные данные», когда используются уже внесенные в программу данные, заполняются поля 1 и 2. Поле ввода 1 позволяет задать три варианта длины оптической волны, проходящей по ОВ.

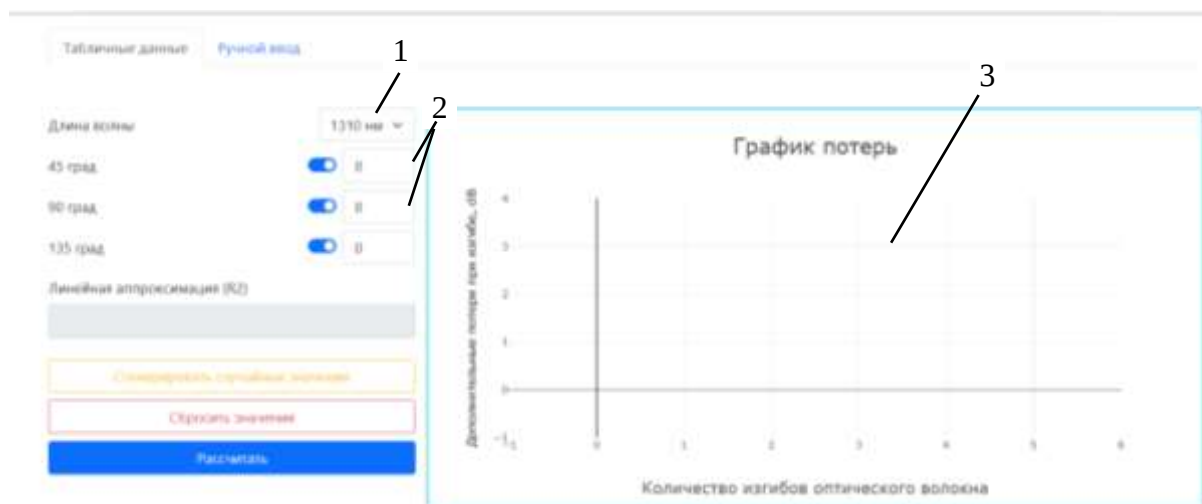


Рисунок 4Ж – Общий вид интерфейса

1 – поле ввода параметров длины волны; 2 – поле ввода параметров угла изгиба ОВ; 3 – область построения графика

Длина волны задаётся путем выбора любого значения 1310,1550,1625 нм. После осуществляется переход к заданию параметров изгиба ОВ. Для этой цели у программного обеспечения (ПО) имеется три поля для ввода числа углов изгиба: 45° , 90° , 135° . При необходимости можно использовать эти поля для ввода количества изгибов ОВ для каждого угла. Можно использовать каждое поле в отдельности или вместе. Всего можно задать максимальное количество изгибов 21. ПО автоматически производит вычисления и выдает результат, а также строит график дополнительных потерь при заданном количестве изгибов. На рисунке 5Ж приведен пример расчета дополнительных потерь, при случайно выбранных количестве углов изгиба ОВ.

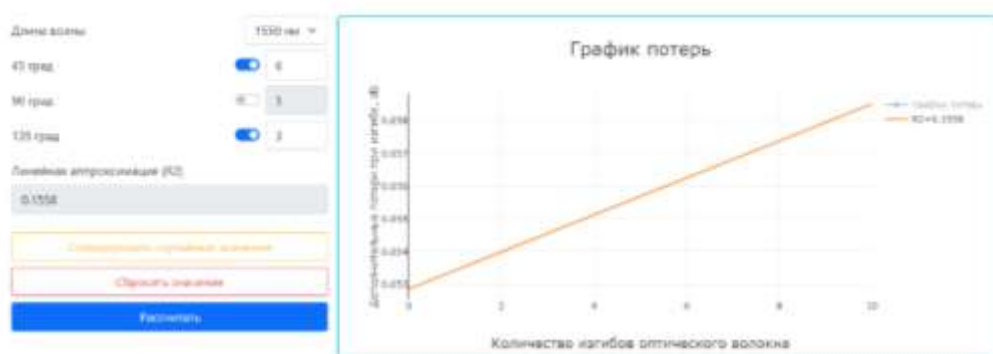


Рисунок 5Ж- Пример расчета дополнительных потерь

Всегда по умолчанию строится линейная аппроксимация и выполняется регрессивный анализ, а также выводится численное значение R^2 . Пользователь может сгенерировать автоматически случайное количество углов изгиба ОВ или сбросить все введенные значения, если возникла необходимость. Программа находится в интернете и представляет из себя сайт. ПО создано на основе языков программирования HTML, CSS и JavaScript. На рисунке 6Ж представлен процесс написания программы [179,180]. Для ускорения разработки программы использовались уже готовые решения, такие как Bootstrap и возможности библиотека для работы с графиками Plotly.



```

+++ --- @ -3,13,3 @
1 - # расчет потерь
1 + # расчет потерь
2 +
3 + ## [ Demo ](https://skifaa.github.io/losses-calculation/)

v 52 @script.js
@ -48,14 +48,17 @ const переключатели = {стенной50переключатель, граде50переключатель, граде110переключатель},
48 48 // Object.freeze
49 49
50 50
51 - * @description Функция , очищает график
51 + * @description Функция , удаляет линии с графиком
52 52 */
53 - функция clearGraph ( ) {
54 - в то время как ( graphDiv , данные , длина > 0 ) {
55 - элемент = удалить_ссылки ( GRAPH_ELEMENT_ID , [ 0 ] ) ;
53 + функция deleteGraphTraces ( ) {
54 + if ( graphDiv & данные & длина > 0 ) {
55 + элемент = newPlot ( GRAPH_ELEMENT_ID , { } , layout , config ) ;
56 56

```

Рисунок 6Ж – Интерфейс кода программы на html, JavaScript

Приложение 3

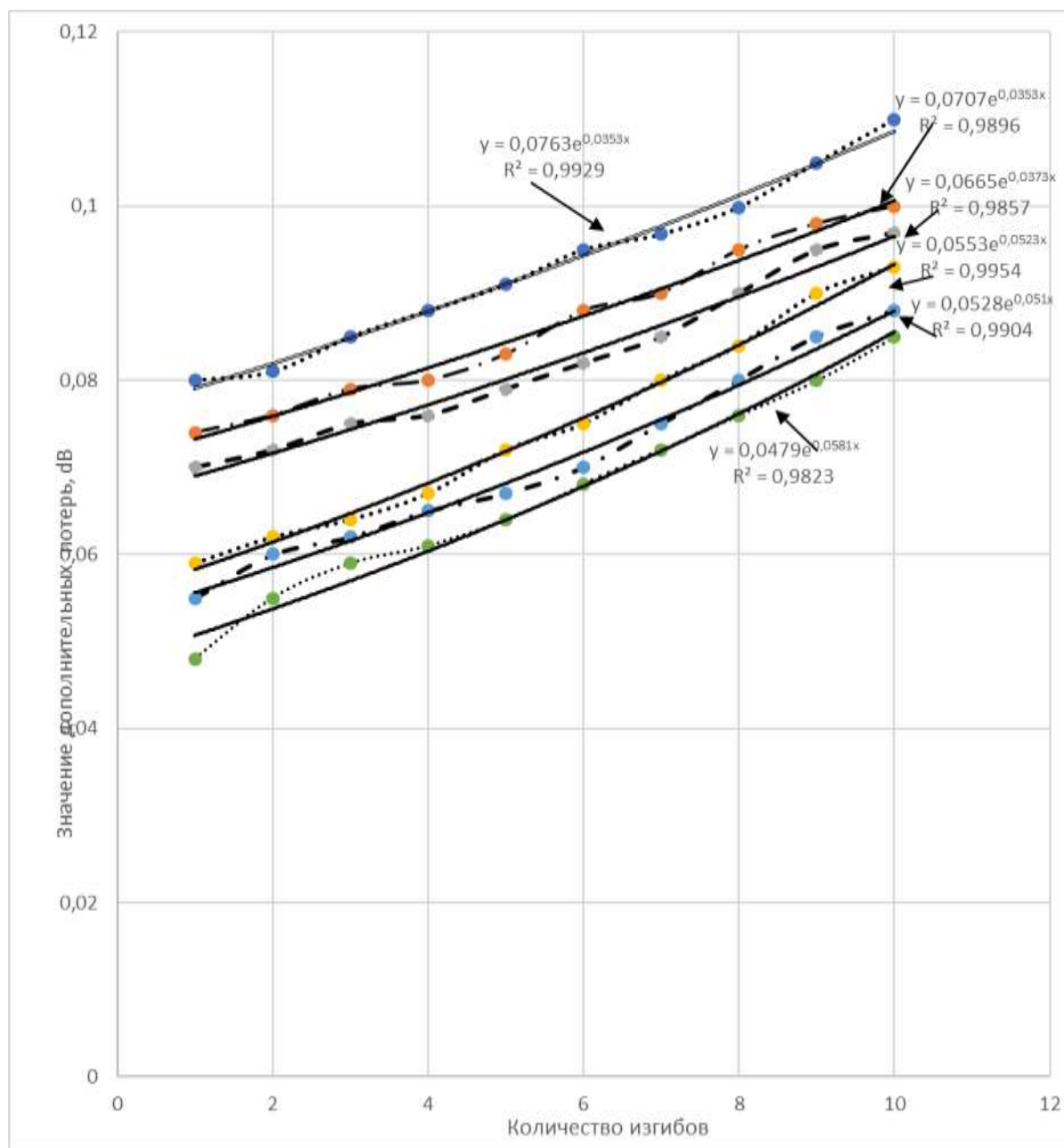


Рисунок 13 - Величина дополнительных потерь оптоволоконного кабеля SNR-UT-12. Значение радиуса r для кривой: 1-3 мм, 2-5 мм, 3-10 мм, 4-12 мм, 5-15 мм, 6-18 мм

мм

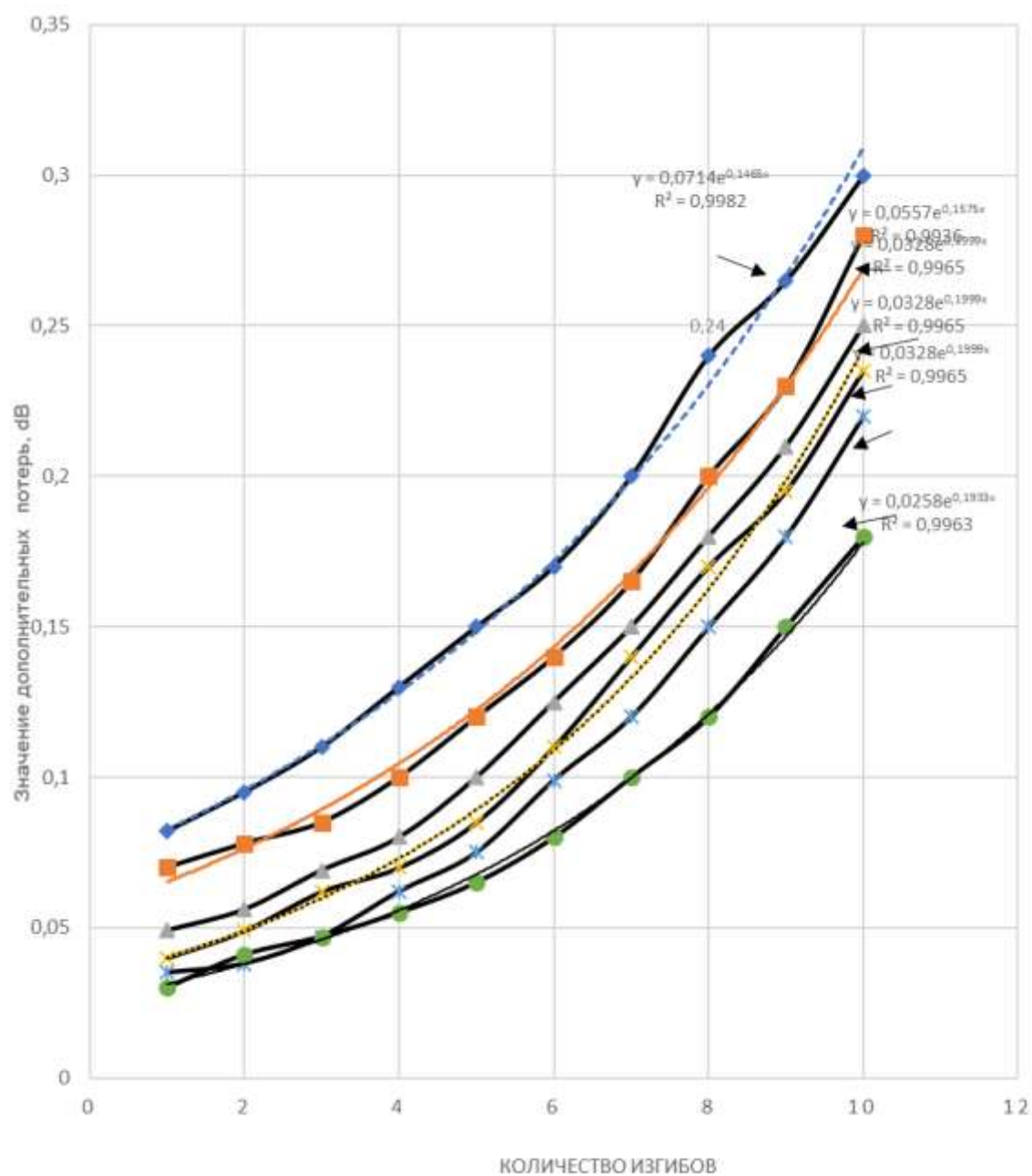


Рисунок 23 - Величина дополнительных потерь оптоволоконного кабеля М6А24.
Значение радиуса r для кривой: 1-3 мм, 2-5 мм, 3-10 мм, 4-12 мм, 5-15 мм, 6-18 мм

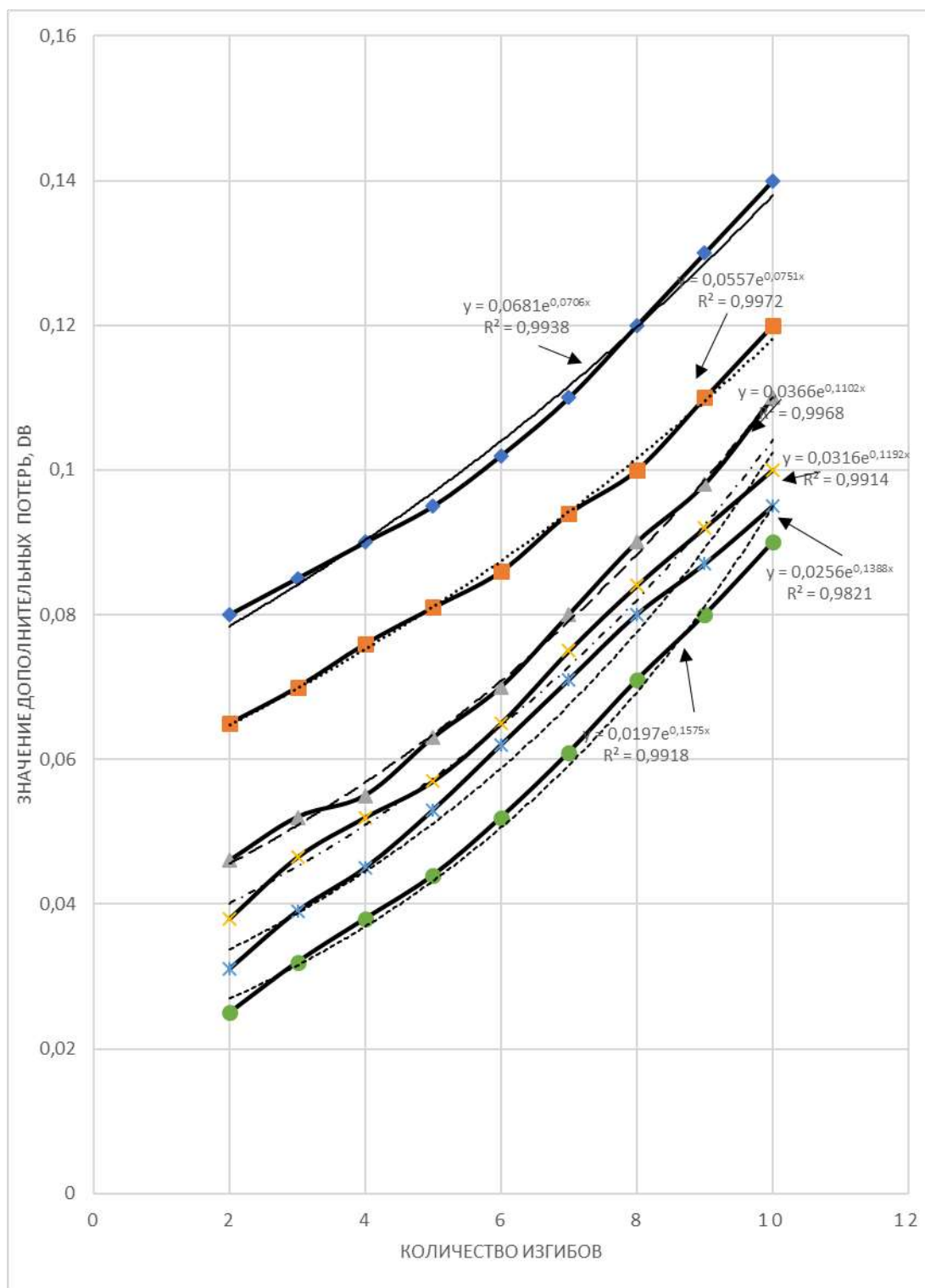


Рисунок 33 - Величина дополнительных потерь оптоволоконного кабеля ОКЛСМ-12-FF. Значение радиуса r для кривой: 1-3 мм, 2-5 мм, 3-10 мм, 4-12 мм, 5-15 мм, 6-18 мм

Приложение И

На рисунке 1И представлена рефлектограмма с внешним воздействием на систему. Из рисунка 1 И видно, что потери резко возросли до 1,95 дБ. Также измерим место внешнего воздействия, которое составило 2,08 км.

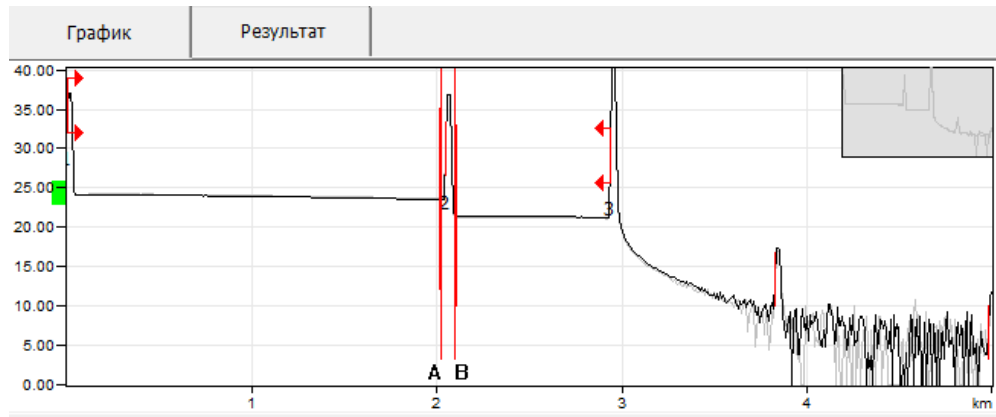


Рисунок 1И– Рефлектограмма при $\lambda_1 = 1310$ нм в случае внешнего воздействия на ВОЛП

На рисунке 2И показана рефлектограмма полученная в случае, когда не было оказано воздействие на ВОЛП. Длина волны $\lambda_2 = 1550$ нм, потери достигают -1,50 дБ.

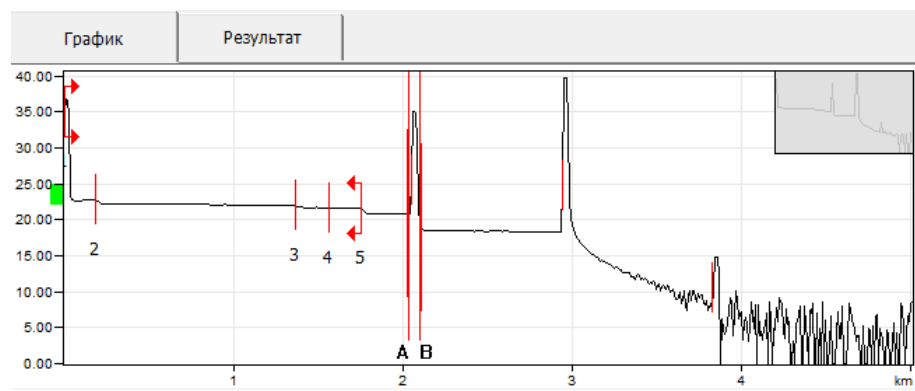


Рисунок 2И – Рефлектограмма при $\lambda_2 = 1550$ нм без воздействия на ВОЛП

На рисунке 3 И представлена рефлектограмма с внешним воздействием на систему. Из рисунка 4И видно, что потери резко возросли до 4,63 дБ. Также измерим место внешнего воздействия, которое составило 2,09 км (рисунок 4И).

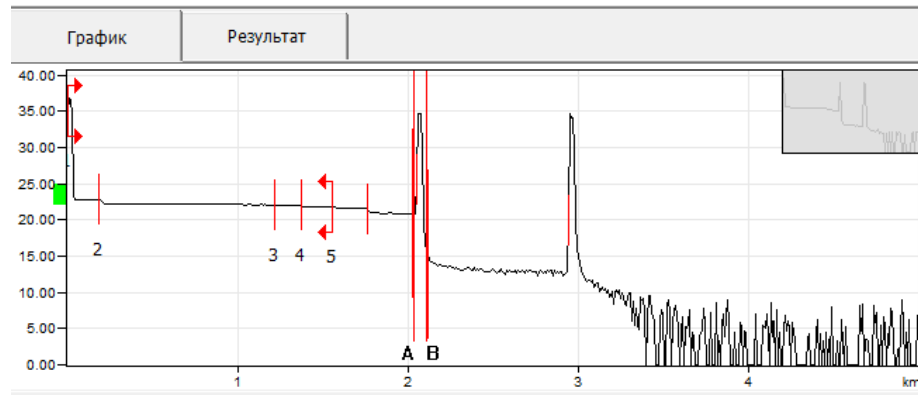


Рисунок 3И – Рефлектограмма на длину волны $\lambda_2 = 1550$ нм с внешним воздействием на систему

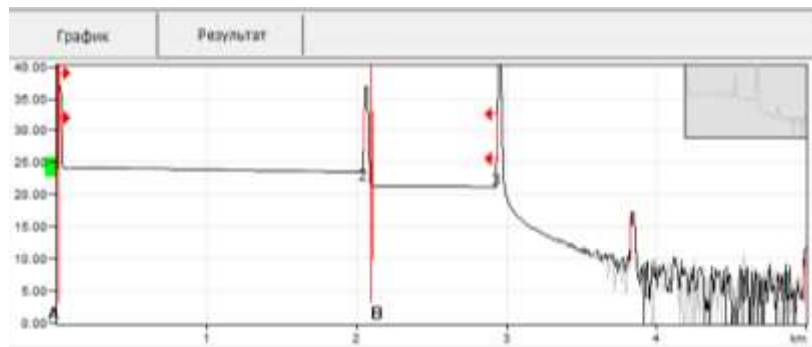


Рисунок 4И – Рефлектограмма волны $\lambda_1 = 1310$ нм с внешним воздействием на систему с местом несанкционированного доступа

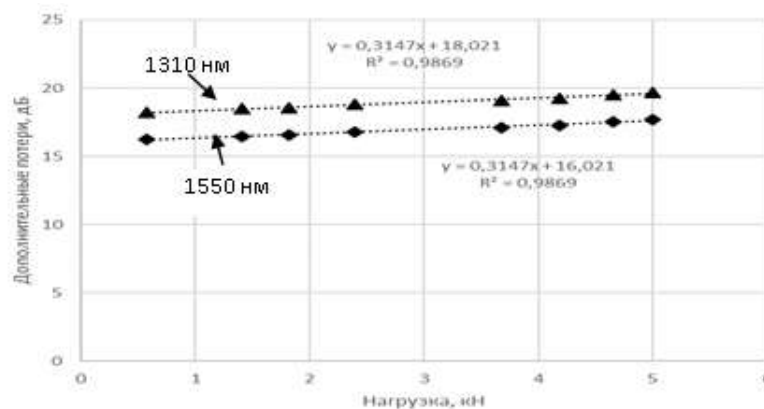


Рисунок 5И – Зависимость роста дополнительных потерь от роста нагрузки на ВОД, длина оптической волны 1310 нм и 1550 нм

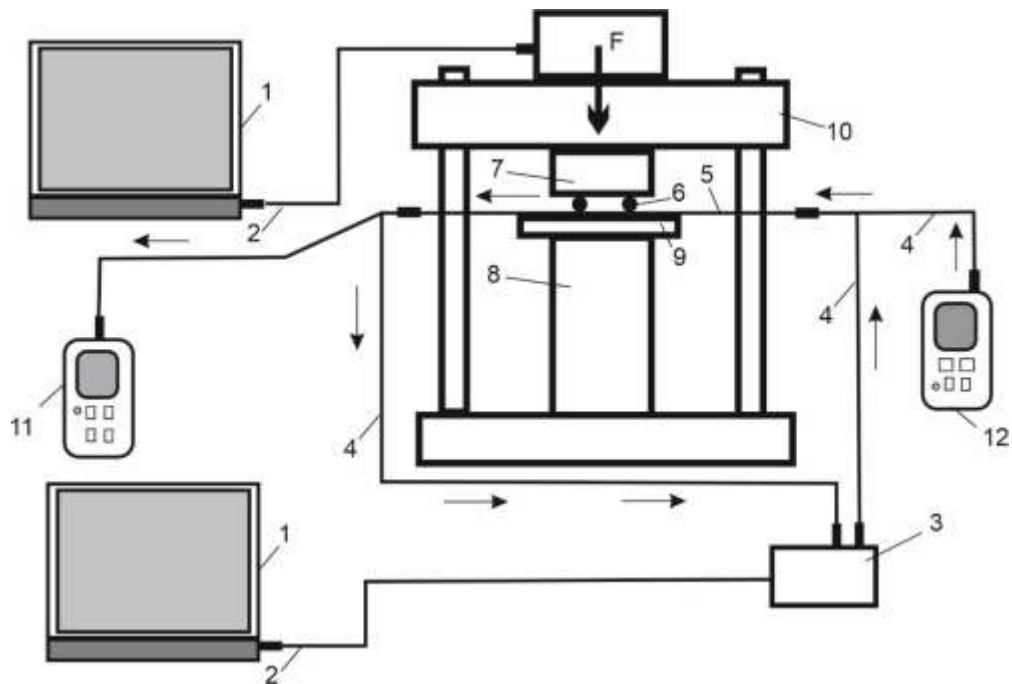


Рисунок 6И – Схема проведения эксперимента по калибровке АПКТК и ВОД

1 – персональный компьютер с АПК; 2 – кабель USB; 3 – блок обработки данных; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – ВОД; 6 – металлический стержень для создания микроизгиба ОВ; 7 – подвижная плита силовоспроизводящей машины; 8 – неподвижная плита силовоспроизводящей машины; 9 – резиновое основание; 10 – силовоспроизводящая машина МСВ-10МГ-4; 11 – источник излучения; 12 – измеритель оптической мощности.

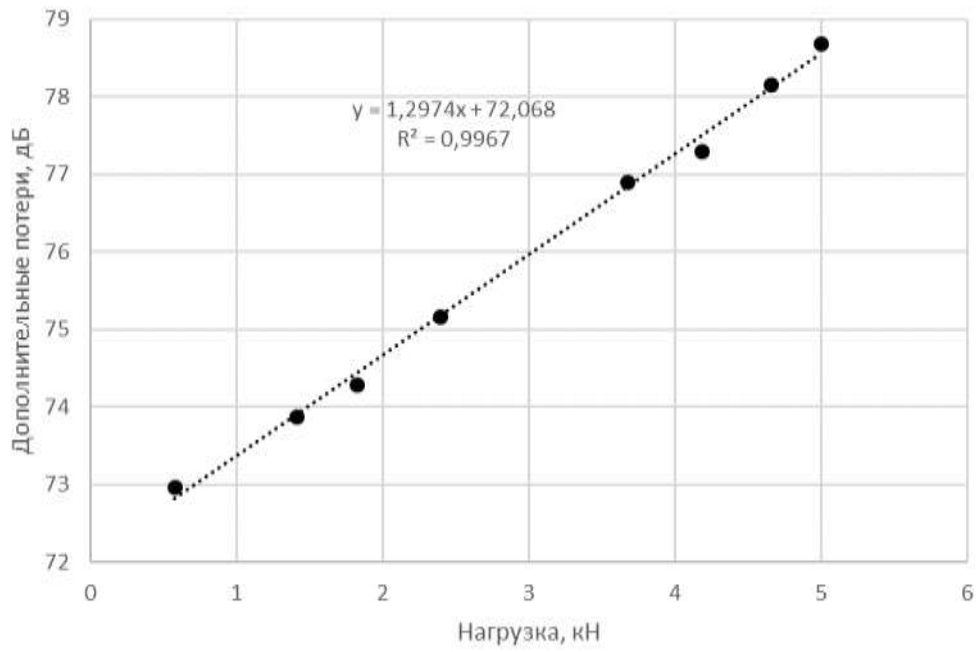


Рисунок 7И – Зависимость роста дополнительных потерь от роста нагрузки на ВОД, длина оптической волны 650 нм

Приложение К



Рисунок 1К - Снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывание сигнализации



Рисунок 2К - Снимок с экрана компьютера при нескольких воздействиях на ВОК и срабатывание сигнализации

Разработаны несколько вариантов АПКТК^{KP}, АПКТК^{K1}, АПКТК^{K2}, которые имели различную конфигурацию, количество каналов и работали с ВОД, также были проведены как лабораторные, так и полевые испытания аппаратно-программных комплексов, предназначенных для измерения давления, смещений, нагрузки и др. [5, 21,22,59] и [141,142, 159-169], среди указанных источников есть статьи, в которых предлагается использовать ВОД для охраны периметров и различных объектов. Достаточно большое количество публикаций посвящено разработке ВОД, все результаты исследований и разработки волоконно-оптических систем контроля различных объектов представлены в [179-189], также подробную информацию о более ранних прототипах можно найти в [194-218]. В указанных публикациях рассмотрены все этапы развития как аппаратной, так и программной части АПКТК^{KP}. Есть разработанные лабораторные образцы автоматических систем охраны различных периметров, в которых использованы ВОД. Также разработано программное обеспечение для АПКТК на языке программирования Python [187-189]. Четырехканальный АПКТК^{K2} прошел лабораторные и полевые испытания, практическая апробация позволила внести корректировки в аппаратно-программную часть, а также произвести некоторые корректировки в режимах работы. Результаты разработки представлены на рисунке 3К, где показаны основные элементы. АПКТК^{K2} имеет систему охлаждения с использованием двух вентиляторов с напряжением питания 12 В; блок питания источника излучения, который оснащен параметрическим стабилизатором тока и напряжения на основе двух микросхем LM317, это необходимо для снижения пульсации лазера и повышения его параметров когерентности. Полупроводниковый лазер мощностью непрерывного излучения 30 мВт рассчитан на работу в длительном режиме, его длина волны 650 нм при отклонении не более 5 нм [187-189].

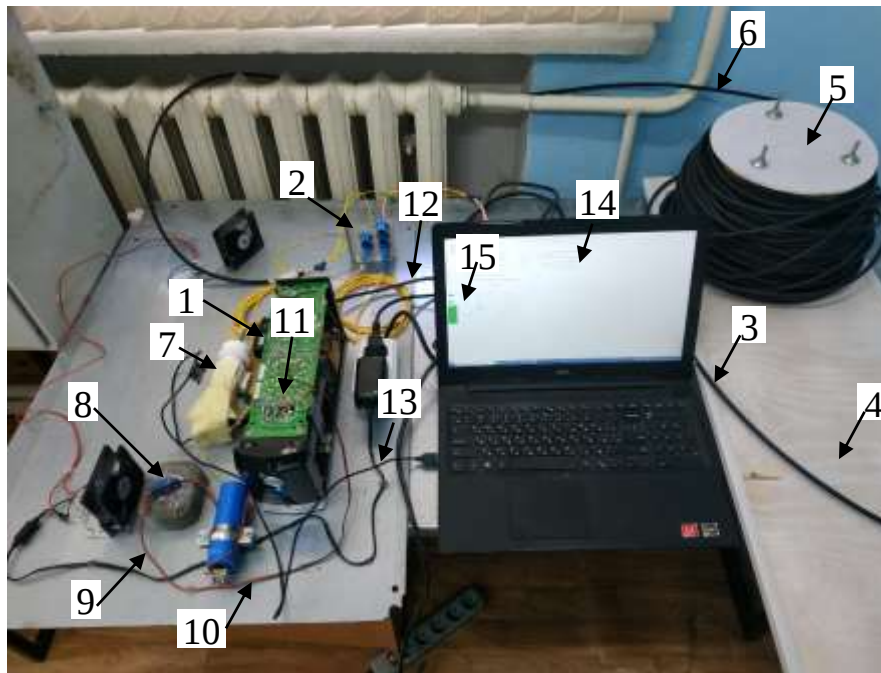


Рисунок 3К - Фото опытного образца

1 – источник лазерного излучения ; 2 – оптический кросс; 3 – волоконно-оптический кабель; 4 – основание; 5 – катушка; 6 – волоконно-оптический кабель (обратное направление); 7 – блок предварительной обработки данных; 8 – источник питания; 9,10 – электрический проводник; 11 – ИБП; 12 – сетевой шнур; 13 – кабель USB; 14 – компьютер; 15 – индикатор срабатывания состояния системы и срабатывания сигнализации.

Испытания проводились в условиях предприятия Астана РЭК (город Астана). АПКТК^{K2} прошел различные испытания в условиях реального производственного объекта и использовался для контроля технического состояния силовых и телекоммуникационных кабелей, находящихся в подземном кабельном канале. На рисунке 4К представлено фото проведения испытаний АПКТК^{K1} и АПКТК^{K2}.



Рисунок 4К – Фото проведения испытаний АПКТК^{К1} и АПКТК^{К2}

На рисунке 5К показано фото кабельного канала, где находятся электрические силовые и телекоммуникационные кабели [187-189].



Рисунок 5К - Кабельный канал [188]

Разработанные опытные образцы АПКТК^{К1} и АПКТК^{К2} способные работать квазираспределенными ВОД, прошли практическую апробацию в условиях Астана РЭК. К сожалению, АПКТК^{К1} показал отрицательные результаты, так как

имел низкую помехозащищенность контрольно-измерительных каналов, что приводило к значительному числу ложных срабатываний. Так как АПКТК^{К1} не смог пройти практическую проверку в полевых условиях, то был исключен из дальнейшей разработки. Алгоритмы обработки данных АПКТК^{К1} не позволяют ему бороться с помехами создаваемыми различными объектами и имеющими разную природу происхождения, но в лабораторных условиях АПКТК^{К1} показывал более приемлемые результаты. Так как АПКТК^{К1} не справился со своей задачей, во всех испытаниях участвовал только АПКТК^{К2}, который показал достаточно приемлемые результаты и способность распознавать и подавлять помехи. В качестве ВОД были использованы ВОК марки КС - ОККО - А - 2 - G.652.D - UCF и КС - FTTN - А - 2 - G.652.D – UCF. ВОД прокладывались в оба конца в кабельном канале от РП197 до ТП 3257, 3258 и 3259. Все объекты находятся на балансе Астана РЭК. Охраняемый участок разбивается на 4 зоны [188]. На рисунке 6К показана условная схема прокладки волоконно-оптических датчиков [187-189].

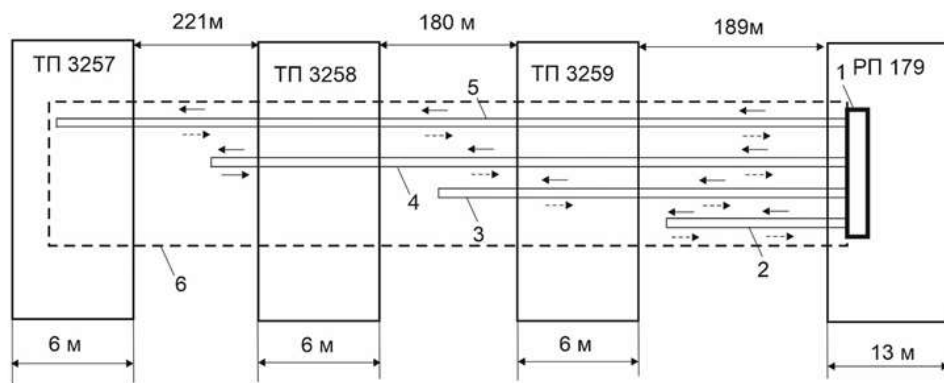


Рисунок 6К - Условная схема прокладки ВОД

1 - блок обработки данных; 2 – канал №1; 3 – канал №2; 4 - канал №3; 5 - канал №4, 6 – условное обозначение кабельного канала

Испытания опытного образца АСК проводились в условиях компании Астана РЭК с использованием реальной электрической сети 10/0,4 кВ, в районе «Депутатский городок» город Астана [188]. Фото улицы с расположением ТП 10/0,4 кВ показано на рисунке 7К [187-189].



Рисунок 7К - Улица с расположением ТП 10/0,4 кВ

На рисунке 8К показан процесс монтажа волоконно-оптических датчиков в кабельном канале работниками компании Астана РЭК [187-189].



Рисунок 8К - Монтаж волоконно-оптических датчиков [187-189]

На рисунке 9К представлен внешний вид двенадцатиканального лабораторного образца АПКТК^{К2}. Для настройки АПКТК^{К2} в качестве ВОД был

использован одномодовый волоконно-оптический патч-корд стандарта G652 с коннекторами SC/SC/UTP, на который оказывалось механическое воздействие. ВОСО имеет ряд настроек уставки срабатывания каждого канала в отдельности, путем настройки параметров фотоматрицы, а также чувствительности и количества воздействий на ВОД. АПКТК^{K2} можно переводить в режим отладки для настройки и режим запуска в фоне для обеспечения охраны.

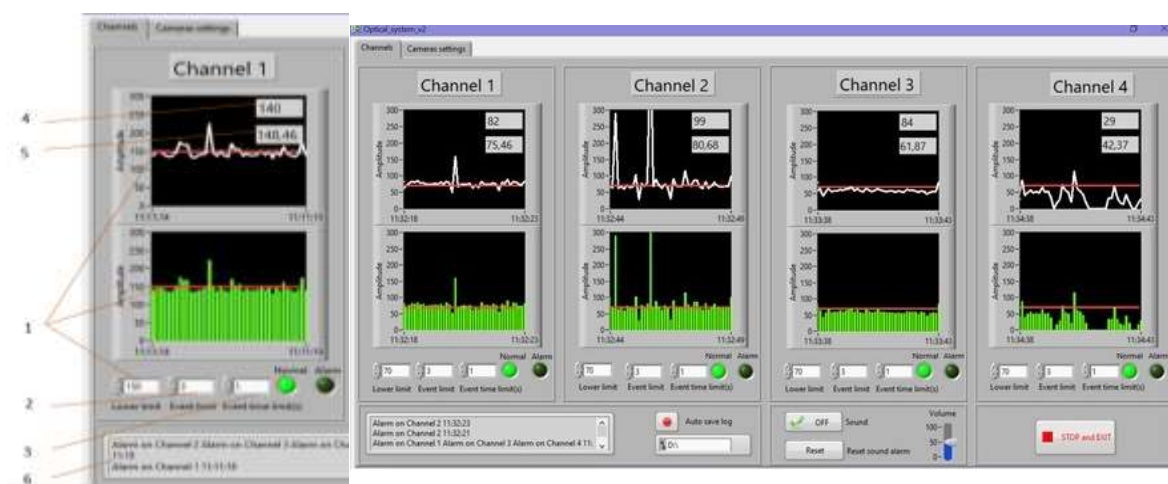


Рисунок 9К - Двенадцатиканальный лабораторный образец АПКТК^{K2}

1 – блок обработки данных; 2 - волоконно-оптический патч-корд; 3 – монитор для визуализации всех процессов настройки.

АПКТК^{K1} в первом варианте использовал секторный анализ светового пятна и реагировал на изменения его геометрических размеров, данный АПК был рассмотрен в статьях, опубликованных в отечественных и зарубежных научных журналах, также в них можно найти подробное описание принципа его действия [151, 153, 156, 158]. Данный АПКТК^{K1} позволяет работать одновременно с четырьмя ВОД и достаточно хорошо реагировал на изменение дополнительных потерь. С его помощью проведен ряд лабораторных опытов по нагружению железобетонных балок, которые были рассмотрены в главе 3. Также АПКТК^{K1} были использован как основа для создания системы мониторинга, рассмотренной в [151, 158]. Нужно сказать, что в процессе экспериментов были

выявлены недостатки в работе АПКТК^{K1}, которые заставили пересмотреть использованные методы обработки данных, полученных от ВОД. Первым и очень существенным недостатком оказалось, что АПКТК^{K1} страдает от помех, создаваемых источником излучения. Для ликвидации данной проблемы, полупроводниковый лазер был оснащен дополнительным параметрическим стабилизатором тока, что повысило стабильность его работы и когерентность, что в свою очередь снизило пульсацию лазера. На рисунке 10К показан прототип АПКТК^{K1}, АПК имеет четыре независимых измерительных канала, к которым подключены четыре квазираспределённых ВОД. В левой части рисунка показаны функциональные части АПКТК^{K1} и элементы настройки. Цифрами показаны два окна с диаграммами, одна - в виде осциллограммы, а вторая - в виде столбиков (баров). По оси Y отложено численное значение измеряемой величины, например, нагрузки или смещения, а по оси X ведется отчет времени. АПКТК^{K1} имеет три основные настройки, которые задаются численными значениями. Первое: «верхний порог срабатывания». Второе: «количество событий в течение заданного времени». Третье: «количество усреднений». Лабораторные испытания показали, что данный АПКТК^{K1} имеет нестабильность в показаниях из-за плохой системы подавления помех. На рисунке 10К представлен случай, когда каждый канал был подключен к собственному источнику излучения с разной когерентностью и уровнем пульсации. Первый и третий каналы показали приемлемые результаты в стабильности измеряемых величин. Второй канал показал удовлетворительный результат, у него было отмечено два значительных всплеска и три незначительных всплеска на осциллограмме. Хуже показал себя четвертый канал, так как у него оказался провал в получении данных, получилось, что часть данных пропала [187-189]. На все четыре ВОД, подключенных к АПКТК^{K1}, было оказано разное по уровню механическое воздействие, при этом оно постепенно увеличивалось при одинаковых промежутках времени. Красная черта и столбики постепенно уменьшались до минимального значения, при этом нагрузка достигла своей максимальной величины.

Рисунок 10К- Прототип АПКТК^{К1}

1 – пороговое значение измеряемой величины, 2 – количество событий в течение заданного времени, 3 – количество усреднений, 4 – среднее значение по амплитуде после усреднения данных, 5 – мгновенное значение по амплитуде, 6 – окно фиксации времени срабатывания.

Чем выше уровень нагрузки на ВОД, тем меньше среднее значение отображаемое в окошке 4, так как с увеличением нагрузки на ВОД уровень дополнительных потерь увеличивается, а интенсивность световой волны снижается. АПКТК^{К1} также может иметь и обратный отчет, когда нагрузка на ВОД увеличивается и дополнительные потери растут, то и значения измеряемой величины отображенные в окошке 4, тоже растут. У АПК есть функция просмотра светового пятна, падающего на поверхность фотоматрицы, представлены два варианта с использованием лазера с длиной волны 650 и 850 нм. Рассмотрен вариант с использованием лазера с длиной волны 650 нм, так как он более массовый в производстве и имеет меньшую стоимость. Также показано, как контролируются геометрические параметры светового пятна и его форма с использованием секторного анализа. При увеличении нагрузки на ВОД размеры пятна по секторам сокращались. В окошке 4 показано среднее значение измеряемой величины по амплитуде после усреднения данных, в окошке 5 показано мгновенное значение по амплитуде. Окно 4 является измерителем для контроля нагрузки или смещения. На основании полученного опыта был сделан вывод, что когерентность лазера имеет достаточно большое значение для

нормальной работы АПКТК^{K1}. На рисунке 11К приведен случай возникновения помех в работе АПК [187+189].

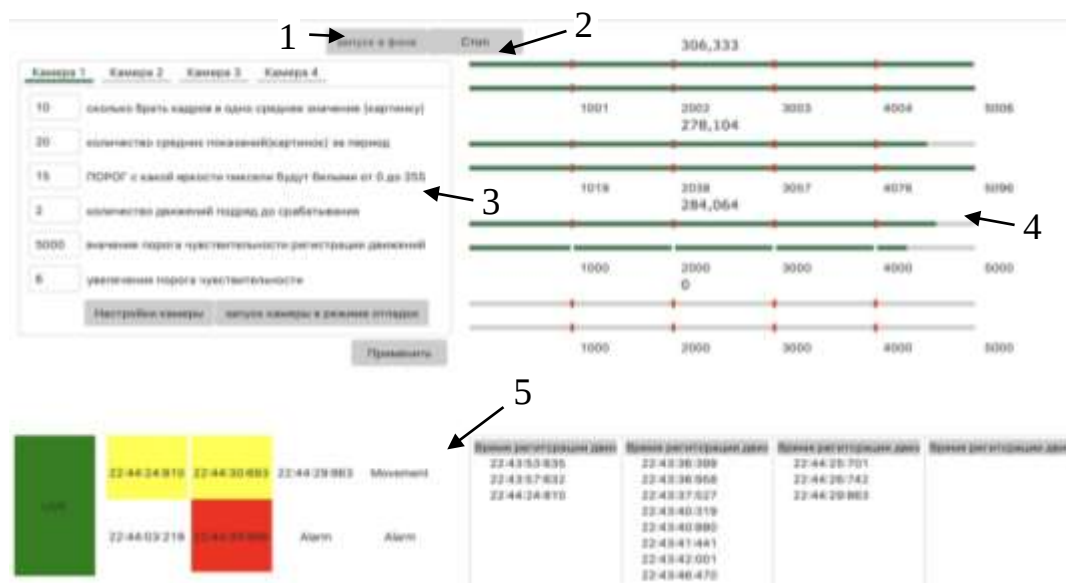


Рисунок 11К – Модернизированный и усовершенствованный АПКТК^{K2}

Также рассмотренный АПКТК^{K1} требовал установки более грубых настроек, так как страдал от плохой защиты от помех на программном уровне. АПК среагировал на увеличение нагрузки на ВОД, при этом столбики диаграммы уменьшились пропорционально нагрузке полностью отсутствовали помехи. Нагрузка не изменялась дискретно и затем не менялась в течение определённого периода времени, и АПКТК^{K1} четко показал, что нагрузка на ВОД сначала ступенчато возросла и более не изменялась, при этом параметры линейности и стабильности измерения были достаточно высокие. Более совершенным и адекватным по своему поведению при проведении измерений стал прототип АПКТК^{K2}, представленный на рисунке 13Ж, это уже принципиально новый АПКТК^{K2}. Можно сказать, улучшенный и модернизированный, но он относится к АПКТК^{K2}. Если в первоначальном варианте АПК использовал секторный анализ светового пятна и реагировал на изменения его геометрических размеров, то от этой идеи пришлось отказаться по причине значительного числа приходящих

помех, с которыми было чрезвычайно трудно бороться, а при использовании более грубых настроек терялась чувствительность АПКТК^{K2}. Интерфейс АПКТК^{K2} претерпел полное изменение, и функции настроек были изменены и расширены. Как сказано ранее, не оправдал себя предложенный метод секторного анализа светового пятна, взамен был предложен новый метод интеллектуального оптико-электронного анализа. АПКТК^{K2} был создан на основе прототипа №1 и использует те же методы для обработки и анализа данных. АПКТК^{K2} прошел ряд практических испытаний и апробаций, а также был задействован в лабораторных исследованиях, результаты которых были опубликованы в статьях [154, 155, 157, 160, 163], также в них можно найти подробное описание принципа его действия и результаты его использования как средства контроля. В источниках [154, 155, 157, 160, 163] приведены результаты исследования ВОД и АПКТК, представлены графики зависимости и сделаны некоторые выводы, касающиеся работы АПК. Данный АПКТК позволяет работать одновременно с четырьмя ВОД и достаточно хорошо реагировал на изменение при контроле нагрузки на железобетонную балку или смещения грунта. На рисунке 12К представлено окно АПКТК^{№2}, который, как сказано, послужил основой для создания АПК, его принципиальным отличием является то, что у него нет канала с распределенным ВОД, подключенным к рефлектометру, что ограничивает его разрешающую способность, отсутствие блока 2 сказывается на точности определения места повреждения.

Используется только квазираспределённый ВОД, который может указать только примерное место расположения трещины в фундаменте, так как расстояние определяется до зоны действия ВОД.

Подробно функционал АПКТК^{K2} рассмотрен в [154, 155, 157, 160, 163], но можно коснуться только особо важных моментов. Интерфейс позволяет разделить модули настроек и приборов для отображения измеряемых величин с целью удобства для пользователя. Отдельным модулем представлена сигнализация. Для запуска АПКТК^{K2} в работу имеется кнопка «Запуск в фоне» (рисунок 12К), позиция 1. Для вывода АПК из работы имеется кнопка «Стоп»,

позиция 2. При изменении настроек обязательно нужно нажать кнопку «Применить».

Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
10			
сколько брать кадров в одно среднее значение (картинку)			
20			
количество средних показаний(картинок) за период			
15			
ПОРОГ с какой яркости пиксели будут белыми от 0 до 255			
2			
количество движений подряд до срабатывания			
5000			
значение порога чувствительности регистрации движений			
6			
увелечения порога чувствительности			
Настройки камеры запуск камеры в режиме отладки			

Применить

Рисунок 12К – Блок настройки камеры

Модуль настроек, позиция 3, позволяет работать с четырьмя ВОД, настраивая каждый по очереди, нажимая кнопку «Камера». Принцип и параметры настройки уже были рассмотрены ранее, когда проводилось описание блока 1, АПКТК^{K2}. Численные значения отображаются в измерителях каждого канала, модуль «приборов для отображения измеряемых величин», позиция 4. Отдельно выделен модуль сигнализации и отправления сообщений, позиция 5. Каждая строка настройки подробно рассмотрена по каждому параметру. Строка «Сколько брать кадров в одно среднее значение» позволяет задать количество кадров, фиксируемых фотоматрицей в единицу времени. Количество кадров будет усреднено в одно изображение, данная операция выполняется АПКТК^{K2} для снижения шумов, сформированных фотоматрицей. При увеличении численного значения по усреднению кадров, увеличивает время реакции детектирования параметров, приходящих от ВОД [154, 155, 157, 160, 163].

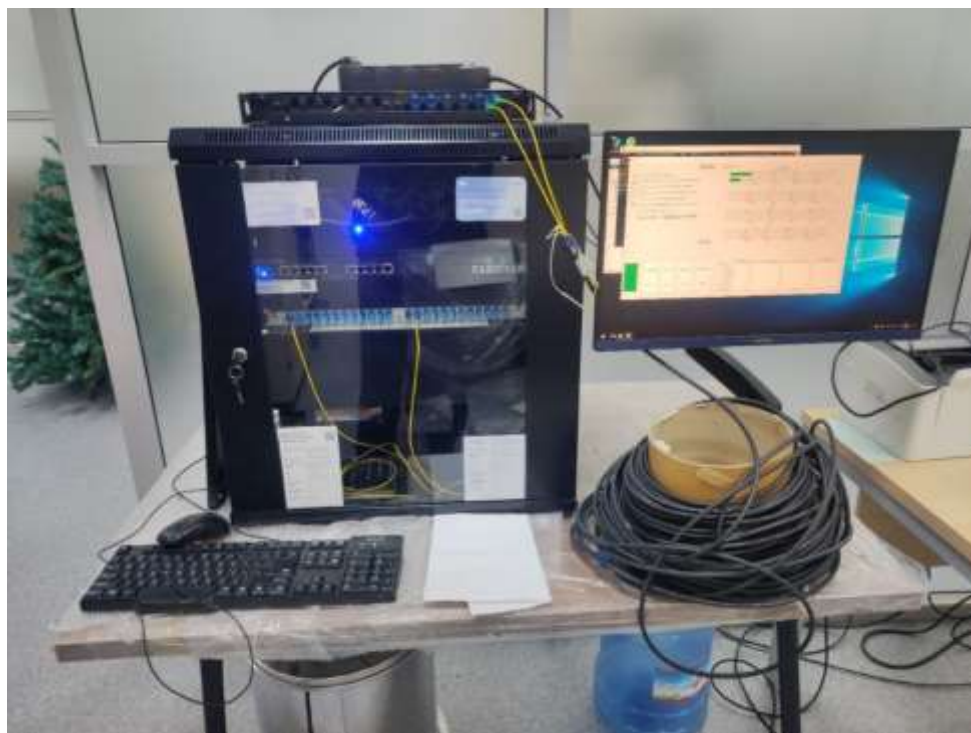


Рисунок 13К - Двенадцатиканальный лабораторный образец АПКТК^{К2}

Цилиндрический оптический модуль (оптический волновод), изготовленный из отрезка пластиковой трубы белого цвета с наружным диаметром 32 мм (рисунок 15К).



Рисунок 14К - Двенадцатиканальный лабораторный образец АПКТК^{К2}



Рисунок 15К - Оптические модули (оптический волновод) различной конструкции

В процессе экспериментов выбиралось фокусное расстояние, рассматривались варианты с полупрозрачным экраном и без него. Также выбирался диаметр пластиковой трубы. Для удобства монтажа фотоприемника на конце трубки устанавливалась пластиковая муфта диаметром 32 мм (рисунок 16К).

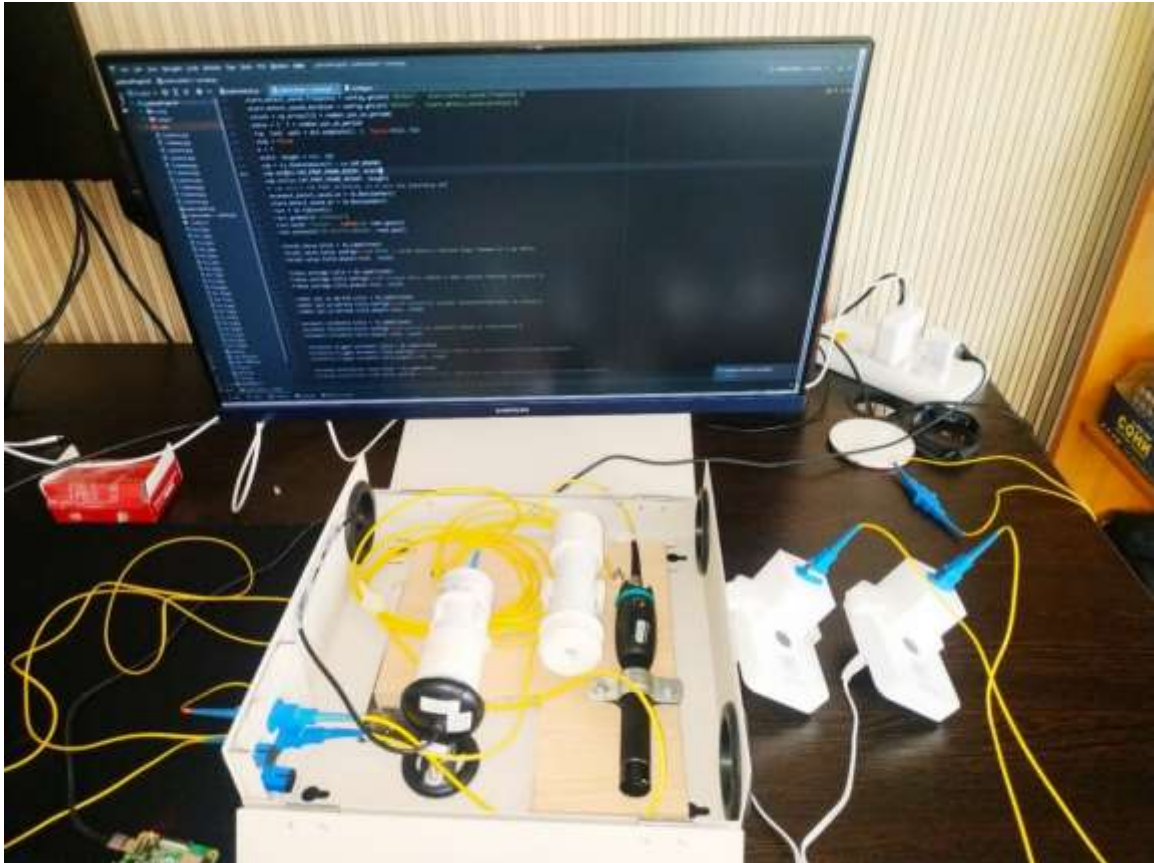


Рисунок 16К - Оптические модули (оптический волновод) различной конструкции

На рисунке 17К представлен процесс перехода пикселей из черного цвета в белый по мере увеличения нагрузки на балку и на сам ВОД непосредственно [163-165, 187-189].

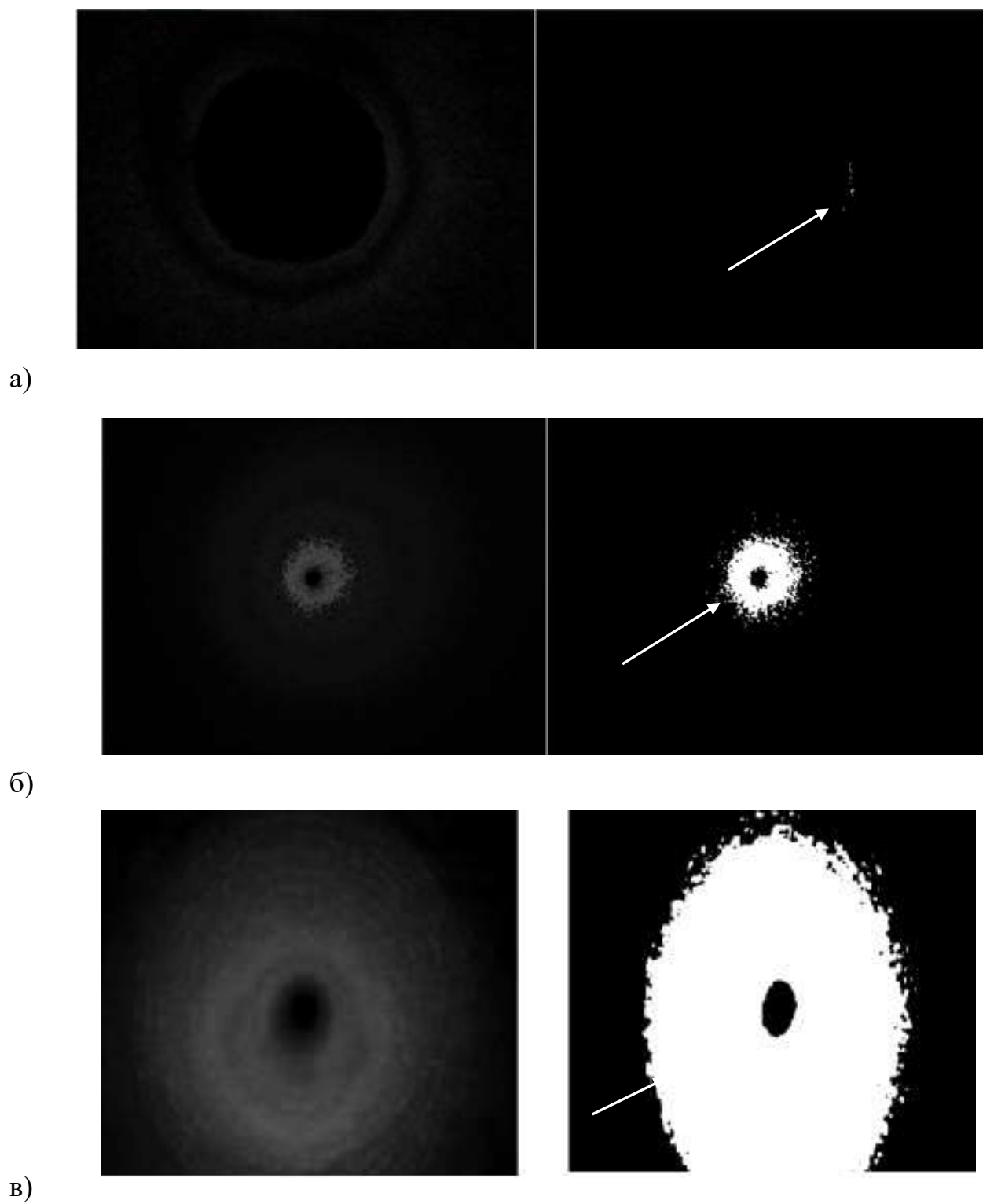


Рисунок 17К - Снимки с экрана компьютера при различной нагрузке

а) нагрузка на балку отсутствует; б) нагрузка на ВОК имеет малую величину; в) нагрузка на ВОК имеет практически максимальную величину

Приложение Л

На рисунке 1Л представлена структурная схема опытного образца АПКТК и фото, на котором показано внутреннее содержание блока обработки данных [159 - 166].

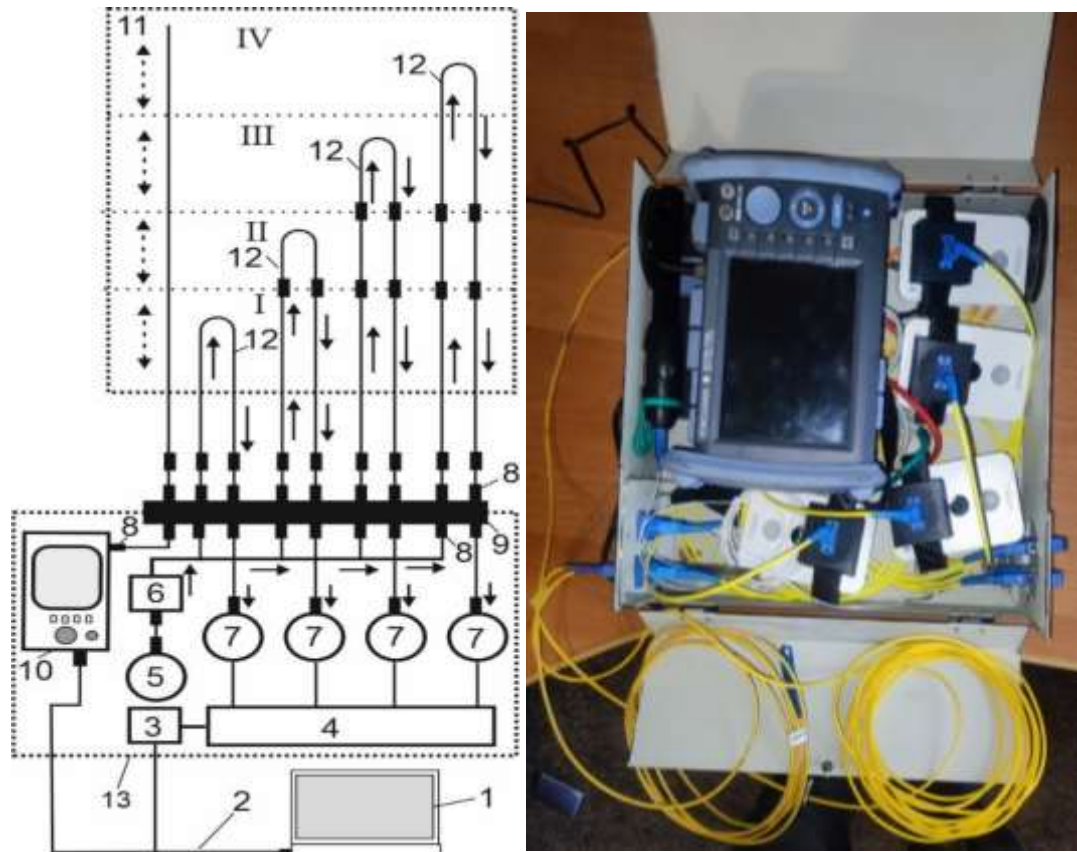


Рисунок 1Л – Лабораторный образец АПКТК [159 - 166].

1 – ПВЭМ с ПО; 2 – кабель USB; 3 - устройство согласования ПВЭМ; 4 – блок предварительной обработки данных (микропроцессор); 5 – источник излучения 650 нм; 6 – сплиттер (оптический разветвитель); 7 – фотоприемное устройство; 8 – оптические соединительные коннекторы; 9 – кросс оптический; 10 – корпус АПК; 11 – кабельный канал; 12 – одномодовый волоконно-оптический датчик (стандарта G652)

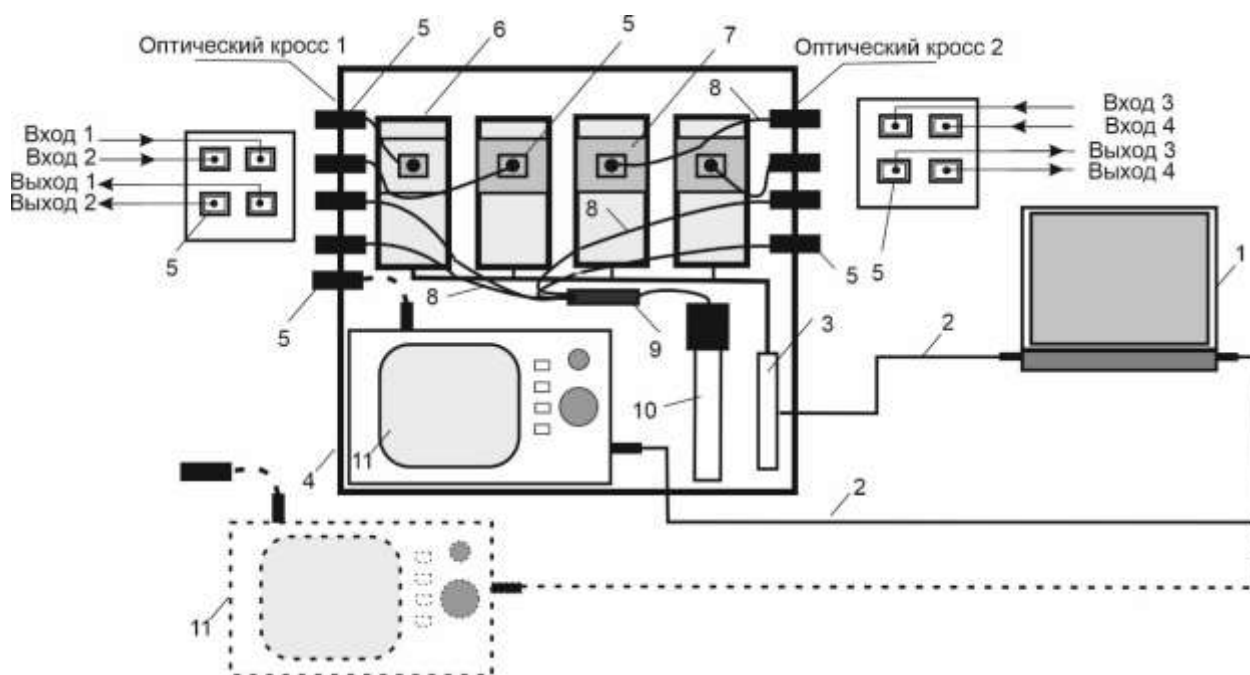


Рисунок 2Л- Структурная схема лабораторного образца АПКТК

1 – персональный компьютер с АПКТК, блок обработки данных; 2 – кабель USB; 3 – сплиттер USB; 4 – корпус блока обработки данных; 5 – оптический адаптер типа SC; 6 – фотоприемник и микропроцессор в едином корпусе; 7 – квадратный корпус оптического модуля (оптический волновод); 8 – оптический патч-корд с коннекторами типа SC; 9 – оптический разветвитель $\frac{1}{4}$ с коннекторами типа SC; 10 – источник излучения; 11 – оптические коннекторы типа SC; 12 – оптический рефлектометр.

Далее на рисунках 3Л и 4Л показаны две разработанные структурные схемы экспериментального образца АПКТК. У схем имеется несколько принципиальных различий. Первый вариант, является более чувствительный и имеет экономию в плане использования ОВ, но для него нужно использовать отражающие элементы, по одному на каждый ВОД. Оптический сигнал проходит в прямом и отражается в обратном направлениях. Вторая схема имеет уже два ОВ, одно ОВ используется в прямом направлении, а другое в обратном для возврата луча к фотоприемнику.

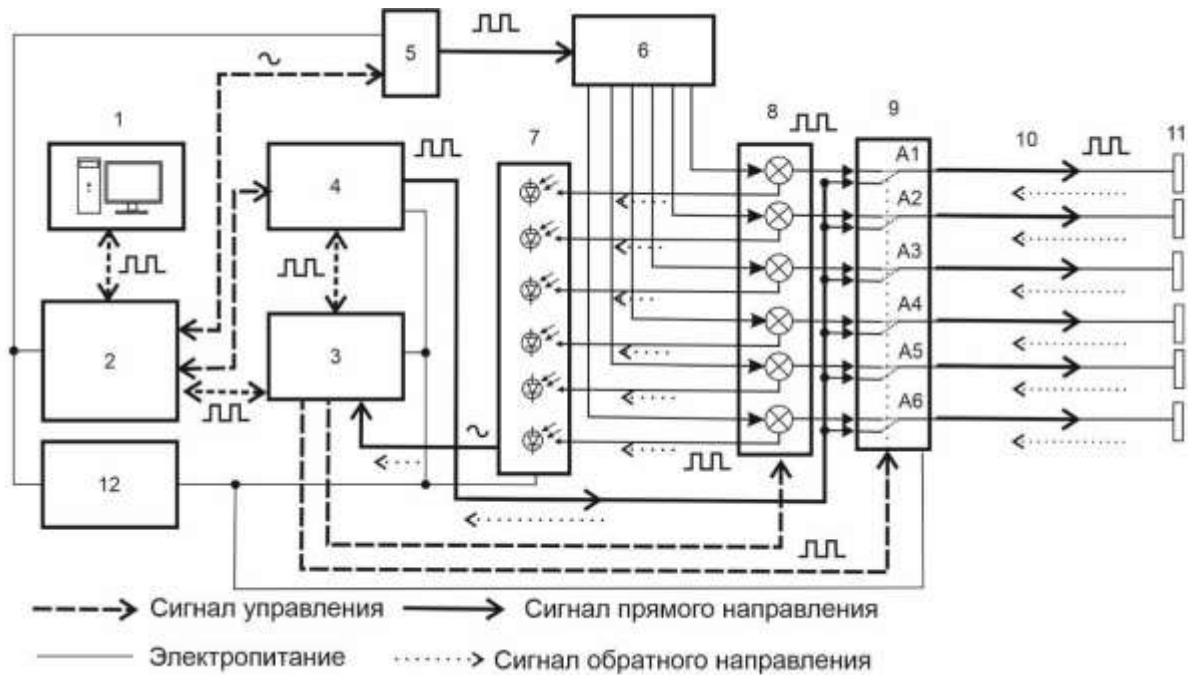


Рисунок 3Л – Первый вариант АПКТК

1 – ПВЭМ; 2 – АПК; 3 – блок предварительной обработки сигналов и логических операций; 4 – оптический рефлектометр; 5 – лазер ; 6 – оптический разветвитель; 7 – фото приёмное устройство; 8 – блок оптического циркулятора; 9 – оптический переключатель; 10 – волоконно-оптический датчик, световод прямого и обратного направления; 11 – отражающий элемент

Первый вариант более сложен в техническом и технологическом плане, но имеет один волоконно-оптический датчик, тем самым имеется экономия светопроводящих жил волоконно-оптического кабеля направляющей системы связи между датчиком и блоком обработки данных. Вторая схема отличается от первой отсутствием оптического циркулятора и наличием обратного световода в точке 10, по которому сигнал прямого направления возвращается к фотоприемному устройству, это значительно упрощает и удешевляет АПКТК, но сокращает количество датчиков, подключенных к одному комплекту до 32, пределом АПКТК является максимальное число каналов равное 64, но для этого понадобится значительная вычислительная мощность.

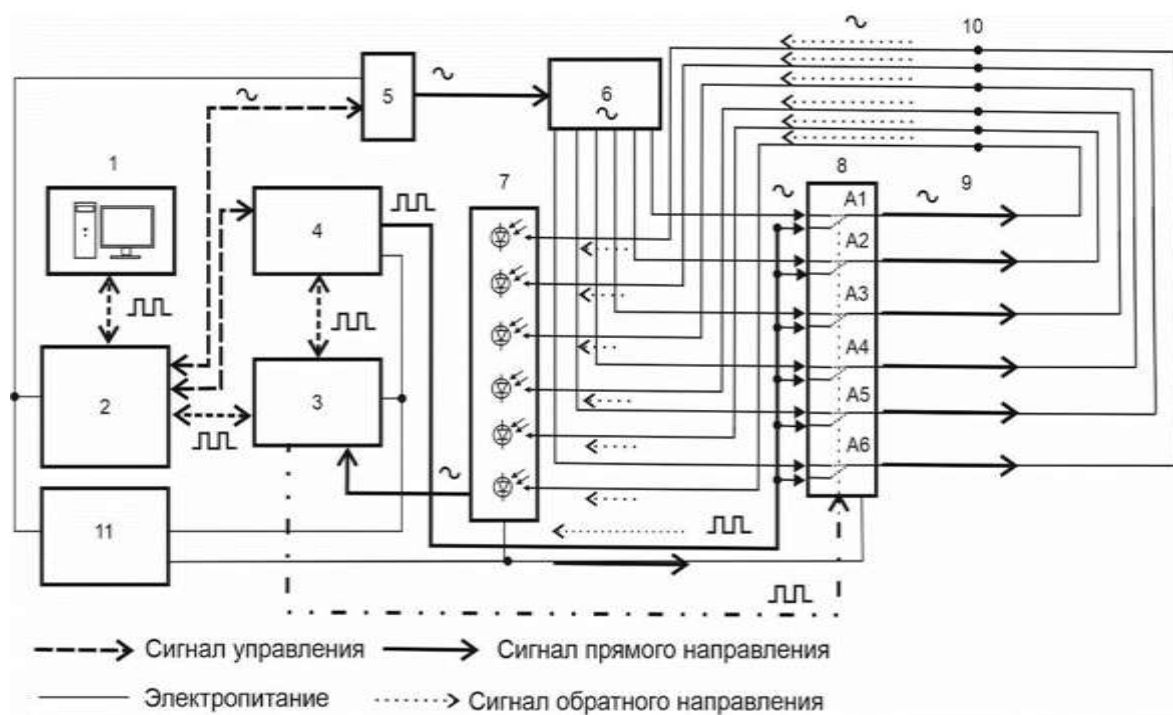


Рисунок 4Л – Второй вариант системы АПКТК

1 – ПК; 2 – АПК; 3 – блок предварительной обработки сигналов и логических операций; 4 – оптический рефлектометр; 5 – лазер; 6 – оптический разветвитель; 7 – фотоприёмное устройство; 8 – оптический переключатель; 9 – волоконно-оптический датчик, световод прямого; 11 – световод обратного направления

Соответственно сокращается зона действия АПКТК. Уменьшается число параллельных каналов для обеспечения помехозащищенности системы и определения не только места вторжения, но и направления движения нарушителя. Чем больше дополнительных каналов с датчиками, тем выше вероятность обнаружения нарушителя. Параллельные каналы позволяют повысить чувствительность системы и снизить вероятность ложного срабатывания системы, так как АПКТК способен обучаться и для его срабатывания в логическом устройстве должно сформироваться несколько сигналов о нарушении технического состояния ВОК. Также оценивается частота воздействия, количество воздействий в секунду, скорость нарастания частоты воздействия и еще множество параметров, разобраться в которых помогает нейронная сеть. Оптический переключатель имеет шесть переключателей с А1 по А6, которые

переключаются каждый самостоятельно и независимо друг от друга. Сканируются оптическим рефлектометром, полученные рефлектограммы сравниваются с эталонными и после анализа при помощи программы определяется место вторжения в охраняемый периметр. После определения места система переключает ВОД на источник лазерного излучения и канал начинает работу в охранном режиме охраны. Информация выводится на экран компьютера, указывается участок, где произошло вторжение и точное расстояние до этой точки. Вся информация хранится на сервере для последующего анализа. АПКТК способен обучаться, что позволяет точно определять вторжение по определенных параметрах входного сигнала. АПКТК контролирует интенсивность и фазу распространения световой волны по ОВ, а также контролирует изменения пиксельной картины светового пятна.

Контроль начинается от оптического красса станции, это точка А, далее до точек В-Ј идут десять контрольно-измерительных каналов с ВОД, при этом ВОД находится внутри ВОК. Соответственно телекоммуникационная компания не несет затрат на приобретение и монтаж ВОД. В реальных условиях внутризоновой (местной или внутриобъектной) системы телекоммуникации возможны разветвления, что серьезно усложняет задачу и делает невозможным использование некоторых уже существующих методов и средств. Использование оптического коммутатора позволяет автоматически подключать переносной или стационарный оптический рефлектометр на любой участок контролируемой системы телекоммуникации. Например, участок от точки А до точки В контролируется одним квазираспределённым ВОД и при срабатывании сигнализации автоматически подключается оптический рефлектометр для установления точного места повреждения или НД. При этом нужно рассматривать, что участок от А до Е имеет разветвления, что не позволяет использовать существующие системы контроля магистральных ВОЛП, так как есть участки от А до Е и от А до F, а также от А до G, соответственно понадобится три независимых оптических рефлектометра. Естественно, в реальных условиях таких участков будет несколько десятков, соответственно на

каждый понадобится свой оптический рефлектометр, что настолько повысит стоимость СК, что ни одна телекоммуникационная компания не станет внедрять у себя подобную систему. Предлагаемый АПКТК имеет ряд преимуществ, так как оснащен квазираспределенными ВОД, которые будут работать независимо друг от друга на участках: А – В; А - С; А – F; А – G; А – E. Стоимость АПКТК достаточно низкая, так как используемые комплектующие не имеют высокой стоимости, об это уже было сказано ранее [187 - 189]. То же касается участков: А – Н; А - I; А – J. Что касается распределенных датчиков, то их будет 6, так как они проходят от начала до конца ВОК. Так как используется только один оптический рефлектометр, то для переключения его входа на сработавший ВОД нужен управляемый оптический коммутатор. АПКТК способен управлять как оптическим рефлектометром, так и оптическим коммутатором, подключая необходимый ВОД для определения точного места повреждения ВОК или НД. АПКТК способен выполнять передачу данных о результатах контроля технического состояния ВОК на пульт оператора, а также на сервер или персональный компьютер, возможно также использование различных мобильных устройств, например смартфонов. Передача сообщений осуществляется по каналам сотовой связи, Wi-Fi или волоконно-оптической линии передачи информации. Так как комплекс подключается к ВОЛП напрямую, то используются более эффективные оптические каналы. АПКТК прошел ряд успешных испытаний в различных организациях.

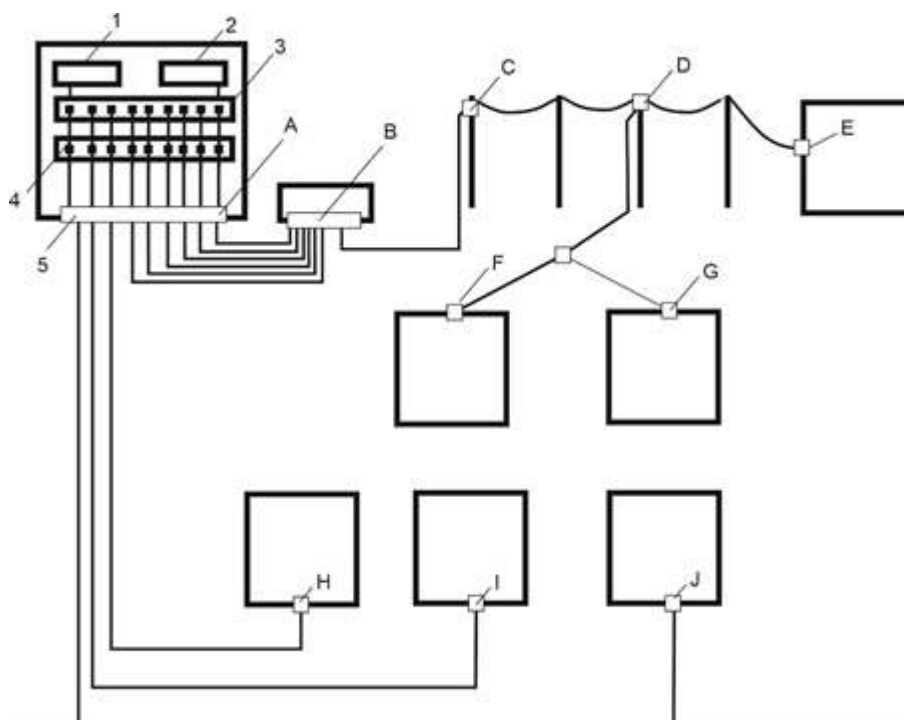


Рисунок 5Л – Условная схема включения АПКТК

1 – АПКТК; 2 – оптический рефлектометр; 3 – оптический кросс с адаптерами типа SC; 4 – оптический коммутатор, 5 – оптическая кросс станция.

На рисунках 6Л – 9Л представлены фотографии практической апробации АПКТК, также имеются акты внедрения



Рисунок 6Л – Апробация АПКТК при проведении лабораторных работ в КарТУ.



Рисунок 7Л— Апробация АПКТК при проведении испытаний по контролю технического состояния ВОК и поиска НД в реальных условиях системы телекоммуникации АО «Казахтелеком»



Рисунок 8Л - Аprobация АПКТК



Рисунок 9Л - Апробация АПКТК



Рисунок 10Л - Апробация АПКТК



Рисунок 11Д - Апробация АПКТК



Рисунок 12Л - Апробация АПКТК

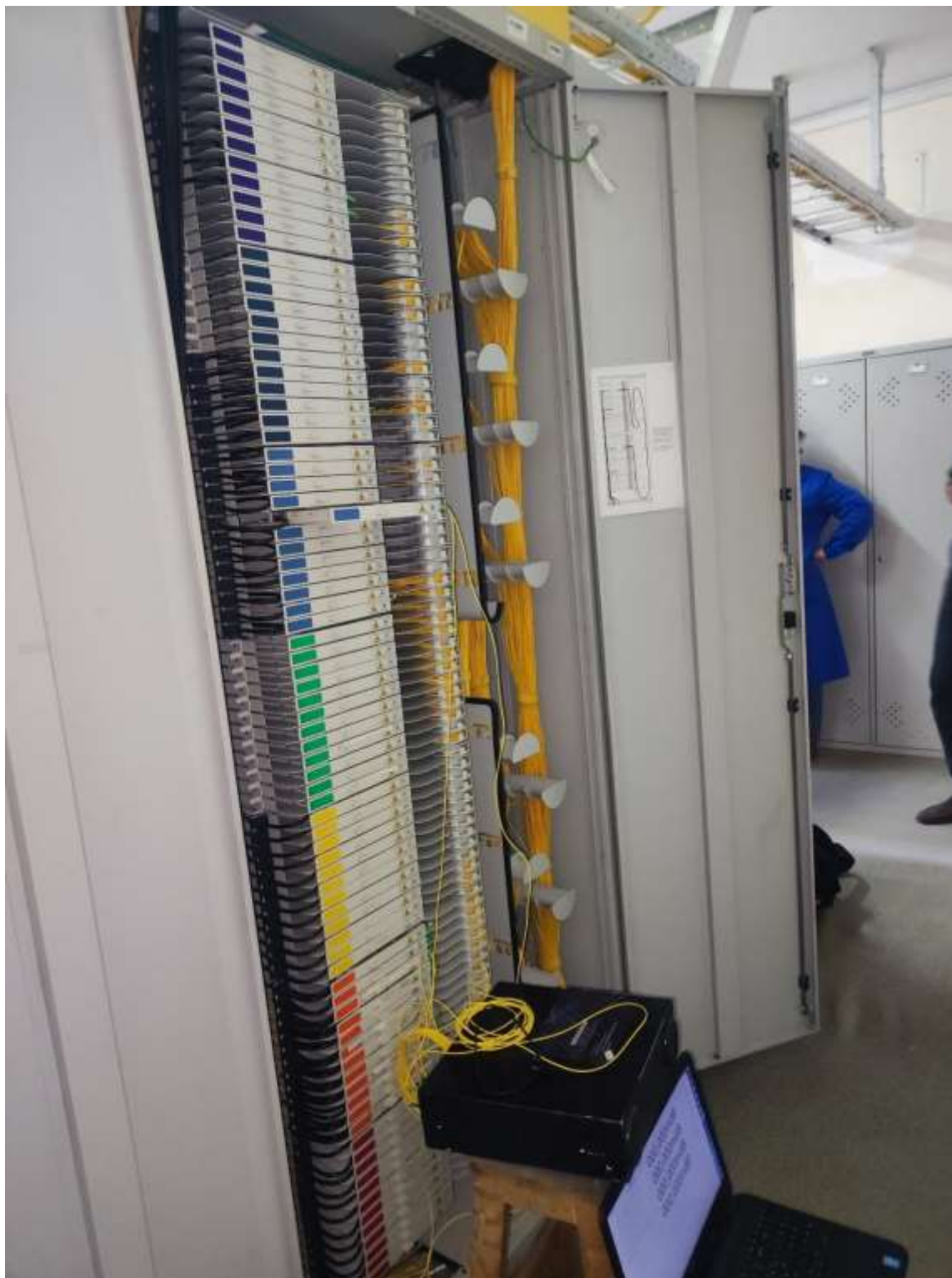


Рисунок 13Л - Апробация АПКТК

Приложение М

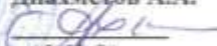
Утверждаю:

Начальник Балхашской дистанции
сигнализаций и связи филиала

АО «НК«КТЖ» -

«Карагандинское отделение
магистральной сети»

Диахметов А.А.


(Ф.И.О.)



о внедрении технического новшества, заимствованного из информационного
материалов научно-технической информации и передового производственно-
технического опыта

Наименование регионального филиала Балхашская дистанция сигнализаций и связи
филиала АО «НК«КТЖ» - «Карагандинское отделение магистральной сети»

Наименование внедренного новшества: Аппаратно-программный комплекс контроля
технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности

Основные технические преимущества внедренного новшества, эффективность и
фактическая экономия за отчетный период: улучшение условий труда, надёжность
устройств связи, безопасность движения, охрана труда, совершенствование технологических
процессов передачи информации, экономия топливно-энергетических ресурсов (нужное
подчеркнуть)

Откуда заимствовано (источник информации): Диссертационной работы Алькиной
А.Д. на тему: «Аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния
оптических кабелей по дополнительным потерям мощности».

Дата и место внедрения: 24.10.2022 г. КИП СЦБ ст. Балхаш

Экономический эффект: (тенге) 24108000

Автор и соавтор (ы) (фамилия и инициалы, должность) Юрченко А. В., доктор
технических наук, профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических
процессов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», г. Томск, Алькина А.Д., старший преподаватель Карагандинский технический
университет, г. Караганда. Аспирант, Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», г. Томск.

Главный инженер


(ФИО, подпись)

Ыкласбеков А.Е.

Экономист


(ФИО, подпись)

Бертаева А.Н.

Технический информатор


(ФИО, подпись)

Ерменбатов О.



«ҚАЗАҚТЕЛЕКОМ»
акционерлік қоғамы
«Желі» дивизионы» бірлестігі
Қарағанды жергілікті желілердің
техникалық торабы
(Қарағанды ЖЖТТ)



Акционерное общество
«ҚАЗАҚТЕЛЕКОМ»
Объединение «Дивизион «Сеть»
Карагандинский технический
узел местных сетей
(Карагандинский ТУМС)

100009, Қарағанды қаласы, Ермеков көшесі, 31
тел.: 8-(7212)-58-94-44, 50-53-50
E-Mail: astana@telecom.kz

100009, город Караганда, улица Ермекова, 31
тел.: 8-(7212)-58-94-44, 50-53-50
E-Mail: astana@telecom.kz

№

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Алькиной Алии Даулетхановны.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Тема диссертационной работы: «Аппаратно-программный комплекс контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности».

1. Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и (или) результатов научной и (или) научно-технической деятельности Основные научные результаты диссертационной работы Алькиной Алии Даулетхановны, старшего преподавателя кафедры «Энергетические системы» Карагандинского технического университета имени А. Сағинова, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлению 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий веществ и природной среды, внедрены в производство и используются для повышения эффективности контроля технического состояния оптических кабелей.

2. Краткая аннотация: Новый метод контроля и оригинальное техническое решение создания квази-распределенной системы волоконно-оптических сенсоров с аппаратно-программным комплексом, для повышения эффективности контроля технического состояния оптических кабелей по дополнительным потерям мощности.

3. Ожидаемый эффект от внедрения результатов диссертационной работы (экономический, социальный, экологический), подчеркнуть область эффекта):

4. Место и время внедрения: 06.03. 2023 год, Карагандинский Технический узел местных сетей Регионального управления сети доступа Центрального региона Объединения Дивизион Сеть - филиал АО "Казакхтелеком"

5. Форма внедрения для использования в производственных процессах: основные научные результаты диссертационной работы, методика, программное обеспечение.

Передача осуществлена на безвозмездной основе. Настоящий акт не является основанием для предъявления финансовых претензий к АО Казакхтелеком.

Директор
Карагандинского ТУМС
РУСП Центрального
региона ОДС
000168



И. Ляли

Приложение Н

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 6862

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2021/1006.2

(22) 26.10.2021

(45) 28.10.2022

(54) Талшықты-оптикалық күзет сигнализациясы жүйесі
Волоконно-оптическая система охранной сигнализации
Fiber optic system of burglar alarm

(73) Алькина Камажай Юсуповна (KZ)
Alkina Kamazhay Yusupovna (KZ)

(72) Даулетханов Аликхан Зангарович (KZ)
Югай Вячеслав Викторович (KZ)
Мекhtиев Али Джаванширович (KZ)
Сарсиkeyев Ермек Жасланович (KZ)
Мади Перизат Шаймуратқызы (KZ)
Алькина Алия Даулетхановна (KZ)
Ковтун Александр Анатольевич (KZ)
Нешина Елена Геннадьевна (KZ)
Мекhtиев Руслан Алиевич (KZ)
Клюева Елена Георгиевна (KZ)
Мутовина Наталья Викторовна (KZ)

Daulet Khanov Alikhan Zangarovich (KZ)
Yugay Vyacheslav Viktorovich (KZ)
Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich (KZ)
Sarsikeyev Yermek Zhaslanovich (KZ)
Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)
Alkina Aliya Daulet Khanovna (KZ)
Kovtun Aleksandr Anatolyevich (KZ)
Neshina Yelena Gennadyevna (KZ)
Mekhtiyev Ruslan Aliyevich (KZ)
Klyueva Yelena Georgiyevna (KZ)
Mutovina Natalya Viktorovna (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Қуантыров
Е. Қуантыров
Y. Kuantyrov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РПТИ «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ПАТЕНТ
PATENT**

№ 7775

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2022/0783.2

(22) 16.09.2022

(45) 27.01.2023

(54) Кез келген ұзартылған нысандар мен темірбетон конструкцияларының апаттық бұзылуын ескертуге арналған күзет дабылының талшықты-оптикалық жүйесі
Волоконно-оптическая система охранной сигнализации для предупреждения аварийного разрушения железобетонных конструкций и любых протяженных объектов
Fiber optic security signaling system for preventing emergency failure of reinforced concrete structures and any extended objects

(73) Алькина Камажай Юсуповна (KZ)
Alkina Kamazhay Yusupovna (KZ)

(72) Мехтиев Али Джаванширович (KZ) Мекhtiyeв Али Джаванширович (KZ)
Аймагамбетова Раушан Жанатовна (KZ) Aimagambetova Raushan Zhanatovna (KZ)
Аубакирова Бахыткул Бохаевна (KZ) Aubakirova Bakhytkul Bokhaevna (KZ)
Қожас Айгүл Кежебекқызы (KZ) Khozhas Aigul Kezhebekkyzy (KZ)
Мәди Перизат Шаймуратқызы (KZ) Madi Perizat Shaimuratkyzy (KZ)
Алькина Алия Даулетхановна (KZ) Alkina Aliya Dauletghanovna (KZ)
Сәрсікеев Ермек Жасланович (KZ) Sarsikeev Yermek Zhaslanovich (KZ)
Мехтиев Руслан Алиевич (KZ) Mekhtiyeв Ruslan Aliyevich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Н. Әбілқайыров
Н. Абулкаиров
N. Abulkairov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»