

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СВЯЗИ**

На правах рукописи

БУЛАВКИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ПОДКЛЮЧЕНИЙ В ПАССИВНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДОСТУПА**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Алексеев Е.Б.

МОСКВА 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Анализ методов построения технических средств вывода информации с ОВ, исследование влияния макроизгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов	14
1.1 Методы вывода информации с боковой поверхности ОВ без внесения локальной неоднородности	15
1.1.1 Получение оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет концентрации рэлеевского рассеяния	15
1.1.2 Получение оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет распределенной связи двух ОВ.....	19
1.2 Методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет созданной локальной неоднородности в ОВ	21
1.2.1 Вывод оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет поперечного сжатия, температурного и акустического воздействия на ОВ ..	22
1.2.2 Вывод оптического излучения из ОВ за счет врезки оптического ответвителя.....	23
1.2.3 Вывод оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет макроизгиба ОВ.....	25
1.3 Исследование влияния величины радиуса изгиба ОВ на величину вносимых потерь ..	27
Выводы к главе 1	34
Глава 2. Исследование и разработка системы обнаружения несанкционированных подключений в пассивных ОСД	36
2.1 Исследование возможностей систем мониторинга ВОЛС в пассивных ОСД	36
2.1 Архитектура и основные принципы работы системы обнаружения НСД	46
2.2 Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС	58
Выводы к главе 2	61
Глава 3. Исследование и разработка методик идентификации макроизгибов и несанкционированных подключений к ОВ.....	63
3.1 Критерий идентификации макроизгибов в ОВ.....	63
3.2 Исследование и разработка алгоритмов идентификации несанкционированных подключений к ОВ	67
Выводы к главе 3	90
Глава 4. Исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину погрешности в точках исследуемого интервала.....	91
4.1 Влияния аппроксимирующей функции при МНК на величину погрешности в точках исследуемого интервала	91
4.2 Получение приближенной математической модели зависимости величины прироста затухания от значения радиуса изгиба ОВ.....	101
4.3 Влияния степени сплайна на величину погрешности в точках исследуемого интервала	111
Выводы к главе 4	124

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	126
ЛИТЕРАТУРА	129

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию и разработке системы обнаружения несанкционированного съема данных (НСД) в пассивных оптических сетях доступа (ОСД) через устройство НСД, создающее макроизгиб оптического волокна (ОВ).

Актуальность темы и состояние вопроса

В последнее время повсеместно растет спрос на широкополосные услуги связи: высокоскоростной доступ в Интернет, передача высококачественного видео, цифровое телевидение, телемосты, видеоконференции и т.д. Если раньше предлагаемые широкополосные услуги были востребованы узким кругом потребителей, то в последнее время интерес к широкополосным услугам связи проявляет малый и средний бизнес, а также и конечные пользователи. Часть компаний использует практику, при которой персонал работает из дома. Ключевые вопросы решаются посредством электронной

почты, видео мостов, передач файлов с данными. В ряде компаний с офисами, расположенными в других городах и странах, возникают задачи удаленного обучения сотрудников, проведения собеседований посредством видео мостов. Растущий спрос на цифровое телевидение, увеличение спроса на видео контент Интернета, плюс перечисленное выше являются ключевыми факторами, стимулирующим повсеместное развитие оптических технологий, в том числе и на «последней миле». Среди технологий, решающих задачу оптиковизации последней мили, особое место занимают пассивные оптические сети доступа.[1] Ключевой особенностью пассивных ОСД является использование только пассивных элементов на участке от оптического линейного окончания (ОЛО), приемо-передающее оборудование на стороне оператора услуг связи, до оптического сетевого блока (ОСБ), приемо-передающее оборудование на стороне пользователя, что снижает величину капитальных затрат при строительстве и затраты на эксплуатацию сети. Ключевым элементом пассивных ОСД является оптический разветвитель, с помощью которого осуществляется распределение мощности информационных сигналов, передающихся с ОЛО, по разным ветвям ОСД. Каждый ОСБ из принятых информационных сигналов выделяет адресованную для него информацию. Информационные сигналы, передающиеся со стороны ОЛО, называют «нисходящим» информационным потоком. Для передачи информации от ОСБ до ОЛО используют систему временного уплотнения, при которой для каждого ОСБ выделен свой временной интервал, в который осуществляется передача. При этом гарантируется, что со стороны других ОСБ в этом временном интервале передача информационного сигнала производиться не будет [2,3,4].

В сравнении с медными кабелями оптическое волокно и оптические кабели обладает большей защищенностью от несанкционированного съема данных (НСД) за счет отсутствия электромагнитного излучения с поверхности оптического кабеля. Российскими и зарубежными учеными были проведены

исследования, направленные на изучение возможности получения с поверхности ОВ части оптического излучения. Результаты исследований доказали возможность НСД с поверхности ОВ. [5] Для этого к ОВ могут быть подключения устройства, создающие в ОВ неоднородность, вызванную сдавливанием, макроизгибом, температурного воздействие на ОВ.[6] Существуют и другие способы получения с поверхности ОВ части оптического излучения, однако, в сравнении с изгибом ОВ все они имеют ряд существенных недостатков, связанных с возможностью повреждения ОВ, величины ответвляемой мощности, минимальной длины ОВ. В настоящее существует измерительное оборудование, в работе которого используется изгиб ОВ [7]. Таким образом, используя уже имеющиеся технические средства или средства на их основе, имеется потенциальная возможность осуществления НСД как в магистральных ВОЛС, так и в ОСД.

В связи с участвовавшими случаями промышленного шпионажа, с угрозами террористических актов и хакерских атак задача обеспечения информационной безопасности становится одной из первоочередных [8]. Среди имеющихся средств, использующихся для информационной безопасности, особое место занимает криптография, с помощью которой решается задача шифрования данных. Если кто-то получил доступ к передаваемому информационному сигналу, то для получения полезной информации, полученный сигнал необходимо будет предварительно расшифровать с помощью специального ключа. В случае передачи большего объема данных использование шифрования может быть малоэффективных или просто непригодным из экономических соображений. Это связано с тем, что для шифрования и дешифрования в реальном времени большего объема данных потребуется значительное увеличение вычислительной мощности приемного и передающего оборудования, что в значительной мере скажется на конечной стоимости полученного решения [9].

Для обеспечения информационной безопасности передаваемых сигналов

может использоваться метод своевременного обнаружения и локализация места НСД. В случае несанкционированного подключения или обнаружения НСД система обнаружения будет действовать по заранее определенному алгоритму, одним из пунктов которого может быть переключение передачи информационных сигналов по резервному маршруту. Так, например, оборудование компании Cisco Systems, используемое в ЛВС крупных компаний, может обнаруживать факт подключения в сеть Ethernet нелегального Ethernet устройства с последующей блокировкой сегмента, где произошло подключение [10]. На отечественном и зарубежном рынках целым рядом фирм представлено оборудование, с помощью которого решается задача мониторинга ВОЛС. Наиболее известны следующие системы: Orion (GN Nettest), Atlas (Wavetek Wandel&GOLOermann), Access Fiber (Agilent Technologies), Fiber Visor (EXFO), “Фотон” (ЗАО НПЦ «Спектр», «Травинка» (ФГУП « Концерн «Системпром»).

В большинстве систем для мониторинга ВОЛС используется оптический рефлектометр. Существуют системы мониторинга ВОЛС с возможностью обнаружения НСД [11].

Все приведенные выше системы мониторинга с возможностью обнаружения НСД ориентированы в первую очередь на магистральные ВОЛС, результатом чего является высокая стоимость готового решения. Применение уже имеющихся систем мониторинга ВОЛС в ОСД может быть не эффективных как с экономической точки зрения, так и причине возможного ухудшения показателей системы мониторинга, связанных с архитектурой и принципом построения ОСД. В связи с этим задача разработки системы обнаружения НСД для пассивных сетей ОСД является актуальной. В настоящей работе сделан акцент на обнаружение НСД через устройства, создающие макроизгиб ОВ.

Учитывая особенности существующих ОСД и предполагая дальнейшее изменение топологии сетей доступа в сторону усложнения, автором была

разработана система обнаружения макроизгибов и НСД для ОСД, получены методики и разработаны алгоритмы идентификации макроизгибов без использования оптического рефлектометра, получены критерии, позволяющие идентифицировать НСД среди других причин, вызывающих рост затухания в ОВ, разработан алгоритм, автоматизирующий процесс идентификации НСД.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является разработка системы обнаружения несанкционированного съема данных (НСД) с оптического волокна (ОВ) в пассивных оптических сетях доступа (ОСД).

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются следующие основные вопросы:

1. Проведен анализ методов получения оптического излучения с поверхности оптического волокна.
2. Исследовано влияние изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов с разными длинами волн.
3. Исследована возможность обнаружения макроизгибов ОВ в пассивных оптических сетях доступа с помощью оптического рефлектометра и измерителей оптической мощности.
4. В пассивных оптических сетях доступа выполнен анализ причин, в результате которых в ОВ возможно появление макроизгиба ОВ.
5. Исследовано влияние выбора аппроксимирующей функции на точность получаемого аналитического выражения.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались численные методы, теория алгоритмов, теория алгебраической логики, теория систем управления базами данных (СУБД).

Личный вклад. Все основные научные положения, выводы, рекомендации, составляющие содержание диссертации, разработаны соискателем лично.

Научная новизна работы.

1. Получено расчетное соотношение позволяющее оценить уровень мощности оптического излучения на входе приемника устройства НСД в зависимости от уровня мощности оптического излучения на выходе передатчика, суммарных потерь в ОВ от передатчика до точки НСД, затухания, вносимого устройством НСД и коэффициента сбора оптической мощности, излучаемой ОВ на макроизгибе.
2. Усовершенствована методика обнаружения макроизгибов в ОВ, позволяющая уменьшить время обнаружения макроизгиба ОВ до нескольких секунд.
3. Получено аналитическое выражение зависимости величины прироста затухания оптического излучения от величины радиуса изгиба ОВ путем аппроксимации экспериментальных данных, имеющее расхождение с результатами эксперимента во всех точках исследуемого интервала меньше 1%.
4. Получены критерии и разработана методика идентификации несанкционированных подключений к ОВ, с помощью которой может быть обнаружено несанкционированное подключение через макроизгиб ОВ и сокращено число ложных срабатываний.

Практическая ценность.

1. Разработан алгоритм, автоматизирующий процесс обнаружения макроизгибов ОВ в оптических сетях доступа, за счет применения новой методики и критерия идентификации.
2. Разработан алгоритм обнаружения несанкционированных подключений к ОВ через макроизгиб ОВ, с помощью которого в реальном времени можно фиксировать попытки проведения несанкционированного подключения или факты несанкционированного подключения к ОВ.
3. Предложена система обнаружения несанкционированных подключений к ОВ для пассивных оптических сетей доступа, с помощью которой решена

задача непрерывного мониторинга всех ветвей пассивной сети доступа с целью обнаружения несанкционированных подключений к ОВ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Полученное расчетное соотношение позволяет оценить уровень мощности оптического излучения на входе приемника устройства НСД в зависимости от уровня мощности оптического излучения на выходе передатчика, суммарных потерь в ОВ от передатчика до точки НСД, затухания, вносимого устройством НСД и коэффициента сбора оптической мощности, излучаемой ОВ на макроизгибе.
2. Предложенный критерий позволяет по величине прироста затухания оптических сигналов на двух длинах волн идентифицировать макроизгиб ОВ.
3. Предложенная методика позволяет сократить время обнаружения макроизгибов в ОВ до нескольких секунд.
4. Предложенные критерии позволяют идентифицировать НСД через макроизгиб ОВ среди возможных причин возникновения макроизгибов.
5. Полученное аналитическое выражение зависимости величины прироста затухания оптического излучения от величины радиуса изгиба ОВ путем аппроксимации экспериментальных данных позволяет уменьшить погрешность между результатами аналитического выражения и эксперимента до 1%.
6. Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс обнаружения макроизгибов и НСД в каждой ветви ОСД.
7. Разработанная система обнаружения НСД позволяет в реальном времени проводить мониторинг каждого сегмента ОСД с целью выявления фактов НСД с ОВ за счет макроизгиба, а также хранить историю отклонений исследуемых характеристик.

Реализация результатов работы.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. «Телекоммуникационные и вычислительные системы», МФИ – 2005г., Москва, ноябрь, 2005г.;
2. «Телекоммуникационные и вычислительные системы», МФИ – 2006г., Москва, ноябрь, 2006г.;
3. Московская отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», Москва, апрель, 2007г.;
4. 15-я межрегиональная конференция Московского и Нижегородского отделения НТОРЭС им. А.С. Попова, Нижний Новгород, октябрь, 2007г.;
5. «Телекоммуникационные и вычислительные системы», МФИ – 2007г., Москва, ноябрь, 2007г.;
6. Отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», Москва, февраль, 2008г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 11 печатных трудах, включая 3 статей в научных изданиях, 8 тезисах докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, изложенных на __ страницах, содержит __ рисунков, __ таблиц. Список литературы включает __ наименований. Общий объем с приложениями составляет __ страниц.

В первой главе анализ методов несанкционированного съема данных с поверхности ОВ. Существующие методы можно разделить на 2 класса. К первому классу относятся методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, не создающих в ОВ локальных неоднородностей. К этому классу относится метод вывода информации с боковой поверхности ОВ за счет концентрации рэлеевского рассеяния и метод

вывода информации с боковой поверхности ОВ за счет распределенной связи двух оптических волокон волокон. Ко второму классу относятся методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, создающих в ОВ локальную неоднородность. Локальная неоднородность может быть вызвана сжатием ОВ, его нагревом, акустическим воздействием на участок ОВ или макроизгибом ОВ. На рынке представлены устройства, принцип действия которых основан на внесении локальной неоднородности за счет макроизгиба ОВ. С помощью этих устройств или устройств на их основе может быть осуществлен НСД с ОВ. Другие методы либо имеют сложную техническую реализацию, либо носят деструктивный характер воздействия на ОВ. В этой связи акцент сделан на обнаружение НСД с помощью устройств, создающих макроизгиб ОВ. Результаты исследования влияния величины радиуса изгиба ОВ на величину вносимого затухания показали, что прирост затухания для оптических сигналов в области 1.6 мкм может более чем в 2 раза превосходить прирост затухания для оптических сигналов в области 1.55 мкм.

Во второй главе исследована возможность обнаружения макроизгиба ОВ в разных участках ОСД с помощью двух методик, а также разработана система обнаружения макроизгибов и НСД для ОСД. В результате исследования было установлено, что НСД может быть проведен в любой ветви ОСД. В ОСД также имеются ветви, в которых уровень мощности оптического сигнала может быть на несколько дБм выше требуемого уровня на приеме, что может быть использовано для проведения скрытного НСД. Исследование возможностей оптического рефлектометра в сетях ОСД показало, что в случае появления неоднородности могут быть серьезные затруднения с установлением места появления неоднородности, при этом мониторинг уровня мощности контрольного сигнала позволяет однозначно точно установить ветвь с новой неоднородностью. В этой же главе представлена разработанная автором система обнаружения макроизгибов и НСД, учитывающая особенности

пассивных ОСД. Система обнаружения макроизгибов и НСД состоит из трех ключевых элементов: 1) подсистемы диагностики состояния ВОЛС, 2) подсистемы анализа изменений характеристик ВОЛС, 3) подсистемы управления. Подсистема диагностики ВОЛС необходима для получения в реальном времени информации об одной или нескольких исследуемых характеристиках ВОЛС, среди которых может быть информация о затухании оптического излучения, его спектральном составе, оптическая рефлектограмма ВОЛС и другие. Было установлено, что мониторинг ОСД целесообразно проводить с помощью двух контрольных сигналов, уровни мощности которых измеряются на стороне каждого ОСБ, и с помощью оптического рефлектометра, использование которого позволяет установить место появления неоднородности.

В третьей главе получен критерий, с помощью которого может быть установлено, является ли макроизгиб причиной роста затухания в ОВ, а также критерии, с помощью которых устанавливается факт НСД. Также был разработан алгоритм, с помощью которого в автоматическом режиме может осуществляться поиск и обнаружение макроизгибов ОВ. В третьей главе выполнен анализ причин возможного появления в пассивных ОСД макроизгибов ОВ, а также необходимых действий для проведения НСД, в результате чего были получены критерии, разработана методика и алгоритм обнаружения в ОСД НСД с помощью устройств, создающих макроизгиб ОВ.

В четвертой главе проведено исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину относительной погрешности в узлах аппроксимации и точках, лежащих между узлами аппроксимации. Для выбора аппроксимирующей функции, удовлетворяющей заданному критерию, было получено несколько приближенных математических моделей исследуемого процесса. Заменив реальный эксперимент приближенной математической моделью было установлено, что минимальная величина относительной

погрешности на всем исследуемом интервале может быть получена путем аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном.

В заключении изложены наиболее значимые результаты, полученные в диссертационной работе, а именно:

1. Выявлены недостатки систем мониторинга ВОЛС на базе оптического рефлектометра в ОСД для обнаружения НСД за счет макроизгиба ОВ;
2. Получено расчетное соотношение, позволяющее оценить уровень мощности оптического излучения на входе приемника устройства НСД в зависимости от уровня мощности оптического излучения на выходе передатчика, суммарных потерь в ОВ от передатчика до точки НСД, затухания, вносимого устройством НСД и коэффициента сбора оптической мощности, излучаемой ОВ на макроизгибе;
3. Результаты исследования влияния величины изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов с разными длинами волн легли в основу методики и алгоритма идентификации макроизгибов ОВ;
4. Результаты анализа причин возникновения в ОСД макроизгибов ОВ легли в основу критериев, методики и алгоритма обнаружения в оптических сетях доступа НСД с ОВ;
5. Установлен вид аппроксимирующей функций, с помощью которой может быть получено аналитическое выражение зависимости прироста затухания оптического излучения от величины радиуса изгиба ОВ, имеющее расхождение с результатами эксперимента менее 1%;
6. Разработана система обнаружения макроизгибов и несанкционированного съема данных с ОВ в ОСД, с помощью которой в реальном времени определяются ветви ОСД с увеличившимся затуханием, а также устанавливается источник и причина, вызвавшая рост затухания.

Глава 1. Анализ методов построения технических средств вывода информации с ОВ, исследование влияния макроизгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов

Одним из существенных достоинств волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) по сравнению с традиционными системами передачи на металлических кабелях является высокая защищенность от НСД на участке между передатчиком и приемником. Тем не менее, российскими и зарубежными учеными было доказана возможность получения оптического излучения, распространяющегося по ОВ. Данные вопросы, а также вопросы обнаружения НСД рассматривались в работах российских ученых и специалистов: А.В. Яковлева, А.Г. Свинцова, В.Н. Рыжевнина, М.В. Лазарева и др., а также зарубежных ученых и специалистов А. Манько, В. Катока, М. Задорожного, М. Медард, Д. Маркиса, С. Чинна, М. Ислама, Д. Кокера, К. Кнителла, К. Лефебвра и др.

Существующие методы получения оптического излучения с поверхности ОВ можно условно разделить на 2 класса:

1. Методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, не создающих в ОВ локальных неоднородностей [5,12];
2. Методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, создающих в ОВ локальную неоднородность [5,6].

Одной из основных характеристик ВОЛС является энергетический бюджет, который определяется формулой:

$$\mathcal{E} = 10 \lg \frac{P_{пер}}{S_{пор}}, \quad (1.1)$$

где $P_{пер}$ - мощность передатчика оптического излучения, [мВт]; $S_{пор}$ - чувствительность приемника, [мВт].

Величина энергетического бюджета должна превосходить суммарные потери в ОВ, соединителях и т.д. $\sum_i \alpha_i$, что является одним из условий передачи в ВОЛС с требуемым коэффициентом ошибок.

$$\mathcal{E} - \sum_{i=1}^N \alpha_i > 0, \quad (1.2)$$

где \mathcal{E} – энергетический бюджет ВОЛС, [дБ]; α_i - затухание i-го элемента сети, [дБ]; N – общее числа элементов сети, вносящих затухание.

Наличие запаса оптической мощности, который закладывается для компенсации увеличивающегося затухания вследствие старения оптических компонентов, ремонтно-восстановительных и др. работ позволяет отводить с поверхности ОВ часть оптического излучения без нарушения связи или увеличения коэффициента ошибок на принимающей стороне.

1.1 Методы вывода информации с боковой поверхности ОВ без внесения локальной неоднородности

С точки зрения технической реализации рассматриваемые ниже методы являются достаточно сложными. Однако их главным преимуществом является отсутствие или минимальное воздействие на ОВ и передаваемые сигналы.

Существует два основных метода получения с поверхности ОВ оптического излучения без создания в ОВ локальной неоднородности:

1. • За счет концентрации рэлеевского рассеяния;
2. • За счет распределенной связи двух ОВ.

1.1.1 Получение оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет концентрации рэлеевского рассеяния

Этот метод получения с поверхности ОВ оптического излучения за счет

концентрации рэлеевского рассеяния интересен тем, что его реализация не приводит к изменению характеристик ВОЛС. В современных ОВ потери, как правило, связаны с поглощением оптического излучения на примесях, рассеянием на неоднородностях ОВ, рассеянием света на молекулах кварца, из которого выполнены оптические волокна. Неоднородности ОВ и другие причины приводят к тому, что часть оптического излучения рассеивается, отражается, часть оптического излучения покидает сердцевину ОВ, переходя во внешние оболочки. Согласно руководящим документам МСЭ-Т рек. G.652, G.655 для одномодовых оптических волокон потери оптического тракта характеризуются коэффициентом потерь на единицу длины ОВ - [дБ/км] [13,14].

$$\alpha = 10 \log\left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}\right), \quad (1.3)$$

где $P_{\text{вх}}$ - мощность оптического излучения на входе ОВ, [мВт]; $P_{\text{вых}}$ - мощность оптического излучения на выходе ОВ, [мВт].

В настоящее время компанией Corning выпускается ОВ со следующими характеристиками [15]:

-максимум на 1310 нм	0,33 – 0,35 дБ/км
-максимум на 1383 нм	0,31 – 0,35 дБ/км
-максимум на 1490 нм	0,21 – 0,24 дБ/км
-максимум на 1550 нм	0,19 – 0,20 дБ/км
-максимум на 1625 нм	0,20 – 0,23 дБ/км

Очевидно, что снимать информацию с протяженного участка ОВ невозможно как с чисто технической точки зрения, так и с точки зрения параметров принятого оптического излучения. Для реализации устройства отбора оптического излучения (ОИ) необходимо минимизировать длину ОВ, при которой возможно получить сигнал с уровнем мощности, достаточным для приема с требуемым коэффициентом ошибок. Для того, чтобы оценить возможность приема оптического сигнала, рассеянного с сантиметрового участка ОВ, приведем значения минимально допустимых уровней оптической

мощности цифровых сигналов для различных элементов и видов ОСД (в соответствии с Рек. G.983.1 и G. 984.2) [2,16]

Таблица 1.1

Технология ОСД	GPON (ОЛО)	GPON (ОСБ)	BPON (ОЛО)	BPON (ОСБ)
$P_{o.c.}$, дБм	-33	-25	-33	-26

Приведенные уровни мощности оптических сигналов на входе приемника ОЛО и ОСБ гарантируют величину коэффициента ошибок $Кош = 10^{-10}$. Сравним приведенные уровни мощности оптического излучения на входе ОЛО и ОСБ из таблицы 1.1 с уровнем потерь оптического излучения на сантиметровом участке ОВ при условии, что в нем распространяется оптическое излучение мощностью $P_c = 10^{-3}$ Вт = 1 мВт, что соответствует уровню мощности 0 дБм. Если всю энергию, вышедшую с сантиметрового отрезка ОВ, сконцентрировать на входе фотоприемника, мощность полученного сигнала не будет достаточной для обеспечения требуемого качества приема: на 1310 нм - 61.19 дБм, на 1383 нм - 61.46 дБм, на 1490 нм - 63.15 дБм, на 1550 нм - 63.59 дБм, на 1625 нм - 63.36 дБм. Необходимо учитывать, что количество рассеиваемой мощности $P_{рас}$ с участка ОВ произвольной длины зависит от расстояния между передатчиком оптического излучения до конца участка ОВ, затухания участка ОВ $\alpha_{участка}$:

$$P_{рас} = P_{вх} - P_{вх} \cdot 10^{\frac{\alpha_{участка}}{10}}, \quad (1.4)$$

где: $P_{вх}$ - мощность оптического излучения на входе в ОВ, [мВт]; $\alpha_{участка}$ - суммарное затухание участка ОВ, [дБ]; $P_{рас}$ - мощность оптического излучения, теряемая на участке ОВ, [мВт].

Получение оптического сигнала с боковой поверхности оптического

волокна путем концентрации рэлеевского рассеяния может быть реализован с помощью устройства, схема которого приведена на рисунке 1.1 [17]

Для концентрации энергии, вышедшей с боковой поверхности информационного волокна, волокно нужно расположить вдоль одной из фокальных осей внутри эллипсоцилиндра. Внутренняя поверхность такого цилиндра должна быть покрыта отражающим покрытием с максимально возможным коэффициентом отражения. Информационное ОВ в данном случае является излучателем. Отраженные от внутренней поверхности лучи будут концентрироваться на второй фокальной оси эллипсоцилиндра. Если вдоль этой оси расположить оптическое волокно, то с обоих его торцов будет выходить сконцентрированное излучение.

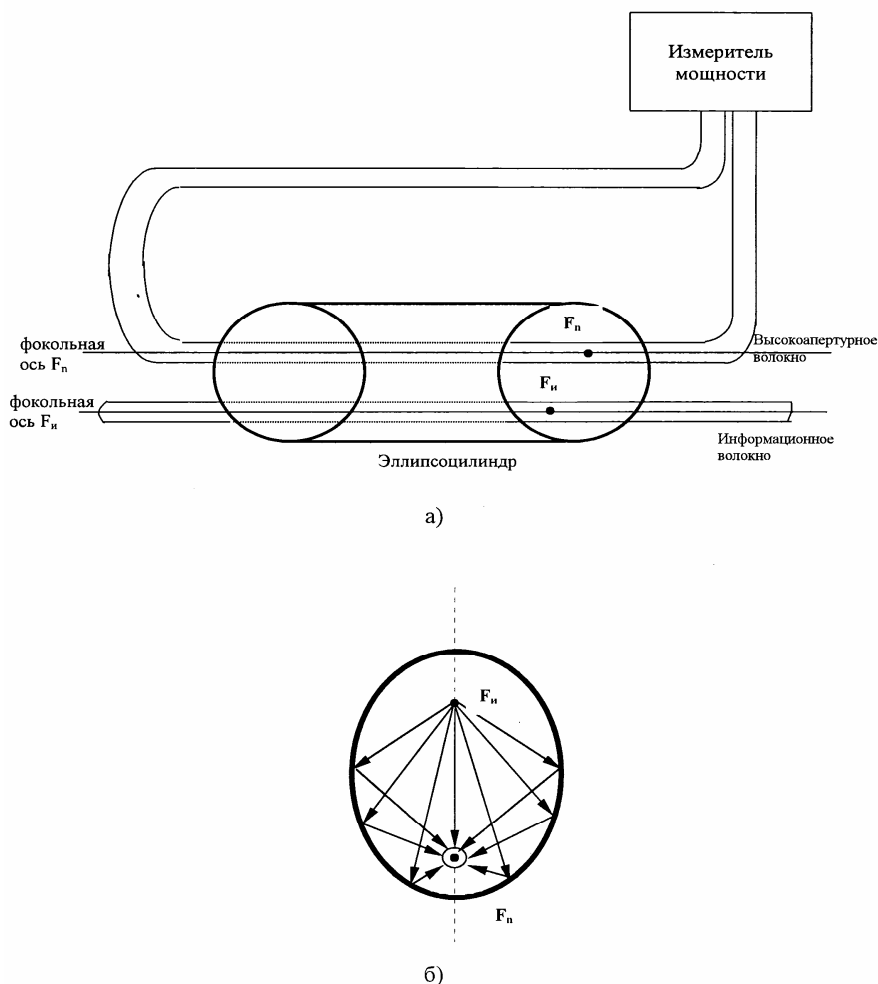


Рис.1.1 Получение ОИ с боковой поверхности ОВ с помощью эллипсоцилиндра

Направляя собранное оптическое излучение на вход фотодетектора или оптического предусилителя, можно осуществлять прием полученного оптического сигнала. Для увеличения эффективности сбора оптического излучения необходимо, чтобы ОВ устройства НСД было высокоапертурным и не имело оболочки на той части своей длины, которая находится в эллипсоцилиндре. На рисунке 1.1 показан ход лучей в поперечном сечении эллипсоцилиндра. Необходимо отметить, что описанный метод ограничен по скорости принимаемой информации. Это обусловлено сдвигом во времени между начальной точкой участка снятия и выходной точкой. Следует отметить, что значительный вклад в затухание вносит не рэлеевское рассеяние, а поглощение оптического излучения материалом ОВ. Также надо учитывать, что при рэлеевском рассеянии не все рассеянное излучение выходит за пределы ОВ, часть оптического излучения направляется в сторону источника излучения.

Основное достоинство рассмотренного метода заключается в том, что его крайне сложно обнаружить. Среди существенных недостатков стоит отметить сложность реализации и малый уровень мощности получаемого оптического излучения.

1.1.2 Получение оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет распределенной связи двух ОВ

Получение части оптического излучения с боковой поверхности ОВ может быть осуществлено с прямого ОВ с помощью второго оптического волокна, расположенного рядом с информационным ОВ. Для этого необходимо, чтобы оси двух ОВ были параллельны друг другу и находились в одной плоскости. При этом используется метод распределенной волноводной связи. Устройство, реализующее этот метод, по принципу работы ничем не отличается от работы направленного ответвителя с распределенной связью. Схема устройства для его реализации представлена на рисунке 1.2.

Информационное волокно ОВ1 и волокно съема ОВ2 могут быть идентичными или отличаться по форме и размерам. Количество энергии, переходящее из ОВ1 в ОВ2 зависит от диаметра оптических волокон ОВ1 и ОВ2, расстояния между осями ОВ1, ОВ и от длины участка связи $l_{\text{св}}$. Для максимального ответвления энергии необходимо уравнивать фазовые скорости волн в обоих волокнах, которые в действительности являются оптическими диэлектрическими волноводами.

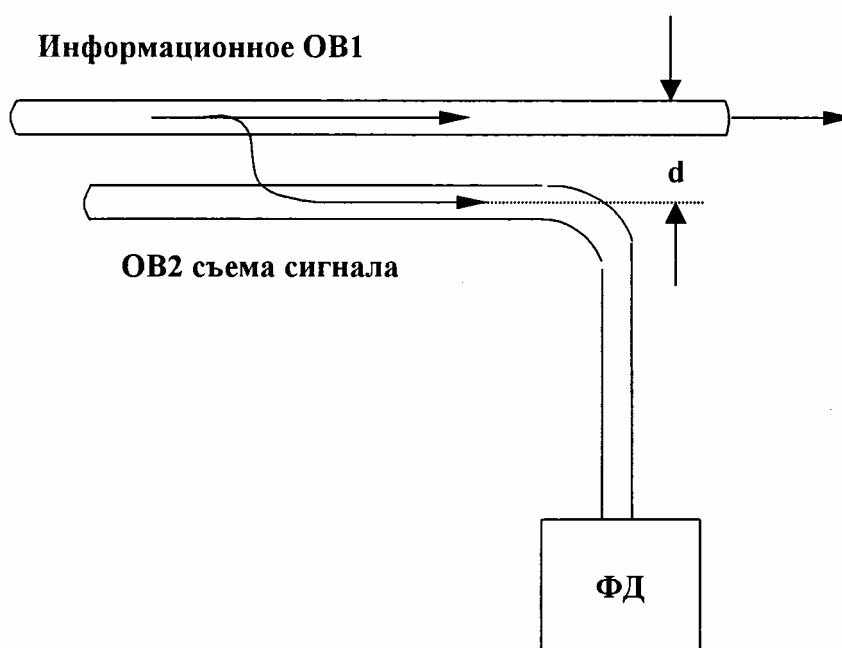


Рис.1.2 Получение ОИ с боковой поверхности ОВ за счет распределенной волновой связи

При определенной длине $l_{\text{св}}$ участка взаимодействия, зависящей от расстояния d между оптическими волноводами и коэффициента замедления, имеет место полная перекачка энергии из волновода ОВ1 в волновод ОВ2, при дальнейшем увеличении $l_{\text{св}}$ происходит периодическое изменение величины передаваемого сигнала из одного волокна в другое. В случае НСД полная перекачка энергии не требуется, т.к. при этом произойдет нарушение связи в ВОЛС. Необходима перекачка незначительной части энергии. Её величина должна быть меньше, чем необходимо для фиксации факта отбора информации средствами контроля параметров оптического тракта ВОЛС по критерию НСД.

Точнее значение коэффициента связи χ_i для $d=2r$ (случай, когда 2 волокна расположены вплотную друг к другу) определяется из выражения [18]:

$$|\chi_i| = 0.671 \Delta^{(0.25)} (kn_1)^{-0.5} \cdot r^{-\frac{3}{2}} \left(\frac{i}{M}\right) \left(1 - \frac{i}{M}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (1.5)$$

где $\Delta = n_1 - n_2$ – разность показателей преломления сердечника и оболочки ОВ (если ОВ одинаковы); $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, [рад/м]; r – радиус волокна, [мкм]; n_1 – показатель преломления сердечников; i – номер связывающей моды; M – общее количество мод (для одномодовых ОВ $M=2$, имеется в виду 2 ортогональные поляризации).

При расстоянии между осями волокон $d = 2r_1$ связь получается очень большой – $\chi=0.5$, что не требуется для рассматриваемого случая. Для уменьшения коэффициента связи χ следует либо увеличивать расстояние d , либо уменьшать длину связи $l_{св}$. Наиболее целесообразным представляется оптимальное соотношение между d и $l_{св}$. Описанный метод весьма перспективен, однако требует дополнительных исследований.

1.2 Методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет созданной локальной неоднородности в ОВ

С точки зрения технической реализации наиболее простым и надежным является метод с внесением локальной неоднородности в информационное волокно. Существует несколько способов создания локальной неоднородности в ОВ [5,6]:

- Поперечное сжатие ОВ;
- Локальное температурное воздействие на ОВ;
- Акустическое воздействие на ОВ;
- Изгиб ОВ.

Кроме преднамеренно созданной в ОВ локальной неоднородности, существуют и запланированные локальные неоднородности. Это места сварки оптических волокон в точках соединения строительных длин ОК, трещины и непреднамеренные изгибы ОВ.

1.2.1 Вывод оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет поперечного сжатия, температурного и акустического воздействия на ОВ

При поперечном сжатии оптического волокна на его длине 3-4 мм происходит уплотнение материала волокна (кварца или полимера), и, как следствие этого, увеличение показателя преломления сердечника и оболочки. По этой причине в волокне появляется оптическая анизотропия, на которой излучение преломляется, и часть его излучается через боковую поверхность. Иллюстрация данного вида внесения локальной неоднородности приведена на рисунке 1.3.

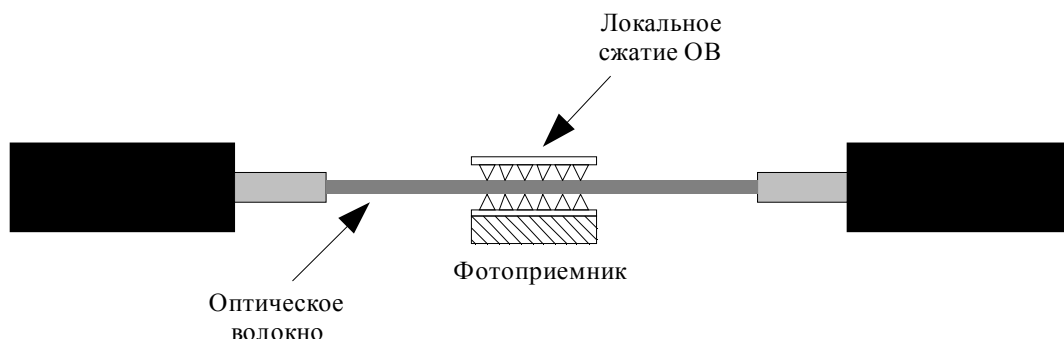


Рис.1.3 Создание локальной неоднородности за счет сжатия ОВ.

При локальном температурном воздействии на ОВ на длине 3-4 мм до $t^{\circ}=200-300^{\circ}\text{C}$ увеличиваются показатели преломления сердечника и оболочки ОВ, в результате чего в волокне также возникает оптическая анизотропия, на которой происходит утечка части оптического излучения во внешнее пространство.

Кроме перечисленных методов создания локальной неоднородности в ОВ, существует и такой метод, при котором дискретная анизотропия в ОВ создается

посредством возбуждения в нём поперечных гиперзвуковых колебаний. При этом в материале волокна, чаще всего кварца, создаются периодические изменения плотности, и, следовательно, показателей преломления сердечника и оболочки. Периодическое изменение показателя преломления есть не что иное, как дифракционная решетка, на которой происходит дифракция проходящего через неё оптического излучения. Часть дифрагирующего излучения попадает в ОВ через боковую поверхность. Необходимо отметить, что дифракционная решетка является частотно селективным элементом, вследствие чего величина энергии, выходящей через боковую поверхность ОВ будет зависеть от длины волны оптического излучения. Данный метод создания локальной неоднородности требует дополнительных исследований.

Описанные выше методы создания локальной неоднородности в оптическом волокне позволяют осуществлять НСД с прямого волокна, что является достоинством, однако, они создают повышенные предпосылки для разрушения ОВ и требуют сложных устройств отбора энергии.

1.2.2 Вывод оптического излучения из ОВ за счет врезки оптического ответвителя

В работе [5], среди прочих рассматривается способ НСД за счет врезки в ОВ оптического ответвителя. Иллюстрация данного способа представлена на рисунке 1.4.

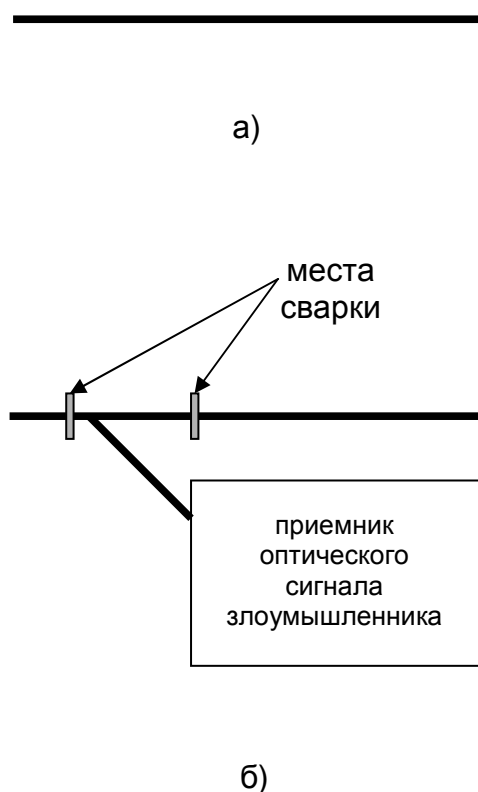


Рис.1.4 Вывод оптического излучения из ОВ за счет врезки оптического ответвителя

На рисунке 1.4а представлен случай, когда к ОВ не было несанкционированного подключения. На рисунке 1.4б представлен случай, когда в ОВ произошла врезка оптического ответвителя. Недостаток данного способа подключения заключается в том, что существует время ΔT , в течение которого происходит нарушение передачи информационных сигналов. В том случае, когда $\Delta T \rightarrow 0$ и величина прироста затухания за счет врезки ответвителя достаточно мала, данный тип НСД может быть не обнаружен.

Как и в случае других ранее рассмотренных способов с внесением в ОВ локальной неоднородности, данный способ характеризуется изменением характеристик передаваемых сигналов, что может быть обнаружено системой обнаружения НСД. Другим недостатком данного способа является невозможность быстрого включения и отключения устройства НСД.

1.2.3 Вывод оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет макроизгиба ОВ

Наиболее изученным из всех возможных видов локальных неоднородностей является макроизгиб ОВ. Исследования по изучению влияния макроизгибов на величину вносимого затухания показали, что [19-27]:

- с уменьшением величины радиуса изгиба ОВ величина прироста затухания ОВ увеличивается по закону, близкому к экспоненциальному;
- при фиксированном радиусе изгиба ОВ величина прироста затухания больше для оптических сигналов с большей длиной волны;
- излучение оптического сигнала в месте изгиба ОВ представляет собой пучок лучей, при этом высвечивание происходит по касательной к дуге изгиба ОВ, все лучи лежат в плоскости витка;

На рынке представлены устройства, использующие в своей работе макроизгиб ОВ. На рисунке 1.5 и 1.6 приведены иллюстрации данных устройств [32].

На рисунке 1.5 представлен оптический тестер, который позволяет установить наличие или отсутствие оптического излучения в ОВ. При этом для работы устройства не требуется производить разрыв оптического волокна удалять с ОВ защитное покрытие.



Рис.1.5 Оптический тестер

На рисунке 1.6 [7] представлено устройство «оптическая прищепка», которая используется, как правило, при строительстве магистральных ВОЛС для организации служебной связи по прокладываемому оптическому волокну.



Рис.1.6 Оптическая прищепка

Данное устройство позволяет без разрыва оптического волокна вводить и выводить оптические сигналы, с помощью которых организуется служебная связь.

Среди достоинств следует отметить малую протяженность ОВ, необходимую для НСД, более стабильные характеристики получаемого

оптического излучения, возможность контроля величины вносимого затухания, наличие коммерческого оборудования, работа которого построена на создании макроизгиба ОВ, и которое может быть использовано для НСД, возможность быстрого включения и быстрого отключения устройства НСД, возможность компенсации вносимых устройством НСД потерь за счет ввода в ОВ соответствующего уровня мощности оптического излучения. Среди недостатков данного способа стоит отметить недостаток присущий всем методам данного класса – внесение изменений в характеристики передаваемых сигналов, что может быть обнаружено системой обнаружения НСД.

1.3 Исследование влияния величины радиуса изгиба ОВ на величину вносимых потерь

К настоящему времени существуют несколько теорий и моделей, объясняющих влияние изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов.

Практическое изучение влияния величины радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов показало, что характер получаемой зависимости далек от идеального экспоненциального вида, на практике могут наблюдаться осцилляции, вызванные как правило тем, что при определенных условиях оптический сигнал отражается от границы раздела двух сред и возвращается в сердцевину, что приводит к уменьшению величины вносимого затухания и, как следствие, к осцилляции величины прироста затухания.

Для одномодового оптического волокна величина потерь в ОВ вследствие макроизгиба имеет вид:

$$L_s = 10 \log_{10} (\exp^{2\alpha L}) = 8.686 \alpha L, \quad (1.6)$$

где α - коэффициент потерь вследствие макроизгиба, [дБ]; L - длина

изогнутого оптического волокна, [мм].

Коэффициент α зависит от длины волны, радиуса изгиба ОВ и параметров оптического волокна. Для одномодового оптического волокна, представляющего собой структуру с одним защитным покрытием было получено, что [19]:

$$2\alpha = \frac{k'^2 \cdot \exp(-\frac{2\gamma^3 R}{3k^2 n_2^2})}{\gamma \beta V^2 K_1^2(\alpha \gamma)} \cdot \int_0^\infty \frac{\chi_2^{1/2} \cdot \chi_3^{1/2} \cdot \exp(-\frac{\gamma R \zeta^2}{k^2 n_2^2})}{\chi_2 \cdot \cos^2 \theta(\zeta) + \chi_3 \cdot \sin^2 \theta(\zeta)} d\theta \quad (1.8)$$

где

$$X_q(x, \zeta) = \left(\frac{R}{2k^2 n_q^2}\right)^{2/3} [\beta^2 + \zeta^2 - k^2 n_q^2 (1 + \frac{2x}{R})]$$

$$\chi_q = \left(\frac{2k^2 n_q^2}{R}\right)^{2/3} \cdot [-X_q(b, \zeta)]$$

$$\theta(\zeta) = \frac{2}{3} [-X_2(b, \zeta)]^{3/2} + \frac{\pi}{4}$$

$$\gamma = (\beta_0^2 - k^2 n_2^2)^{1/2};$$

$$k'^2 = k^2 n_1^2 - \beta_0^2$$

$$V = ka\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} - \text{нормированная частота};$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad - \text{волновое число};$$

$$\beta_0 \quad - \text{постоянная распространения};$$

$$[1 + \frac{2x}{R}] \quad - \text{поправочный коэффициент } n^2, \text{ учитывающий геометрию};$$

K_1 - модифицированная функция Бесселя; R - радиус изгиба ОВ; λ - длина волны оптического сигнала; ζ - переменная, связанная с направлением распространения оптического сигнала в преобразовании Фурье; n_q - коэффициент преломления в области q

Зарубежными исследователями в лабораторных условиях были проведены эксперименты, направленные на изучение влияния величины

радиуса изгиба ОВ на прирост затухания оптических сигналов с разными длинами волн с целью проверить соответствие результатов выражения 1.8 с тем, что получается в эксперименте.

На рисунке 1.7 представлена иллюстрация лабораторного стенда:

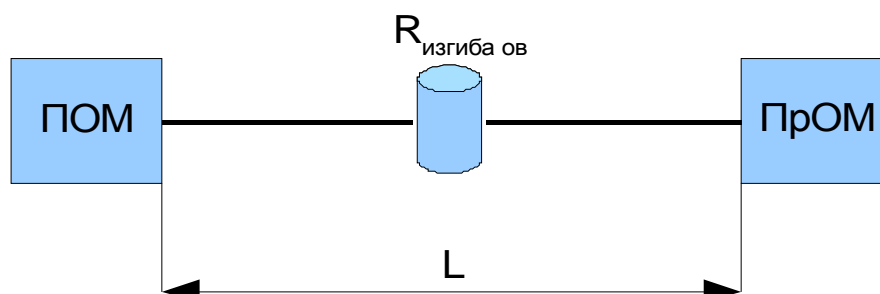


Рис.1.7. Стенд исследования зависимости роста затухания вызванного макроизгибом ОВ

Стенд состоял из передатчика оптической мощности (ПОМ), в состав которого входит перестраиваемый лазер, приемника оптической мощности (ПрОМ), который представляет собой анализатор оптического спектра, оптического волокна длиной L и цилиндра с радиусом R , на котором находится 1 виток ОВ, плотно прилегающий к цилиндру. Перестраиваемый лазер и анализатор оптического спектра использовался для получения более точных значений. Исследования проводились для двух длин волн: $\lambda=1,5$ мкм и $\lambda=1,6$ мкм. Результаты исследования показали, что при фиксированном радиусе изгиба для оптического излучения с $\lambda=1,6$ мкм величина прироста затухания значительно превосходила величину прироста затухания оптического излучения с $\lambda=1,5$ мкм. Результаты эксперимента приведены на рисунке 1.8:

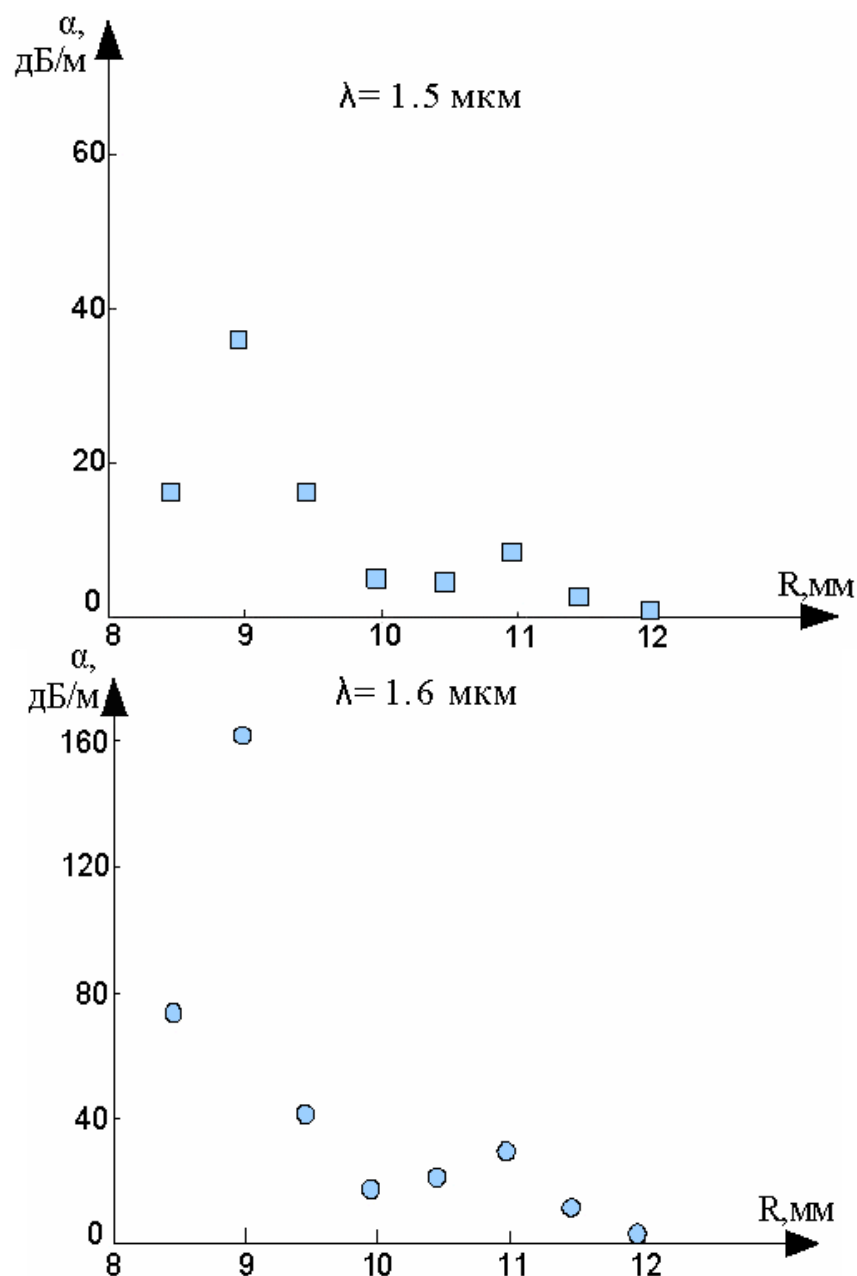


Рис.1.8 Зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ

На рисунке 1.9а и 1.9б представлены как теоретические зависимости потерь в ОВ от радиуса изгиба ОВ при использовании двух различных моделей, описывающих ОВ и процессы, происходящие в нем при изгибе, так и экспериментальные результаты, показанные точками. Исследование зависимости потерь в ОВ от радиуса изгиба проводились для одномодового ОВ SMF28. В случае, представленном на рисунке 1.9а использовалась формула (1.7), оптическое волокно рассматривалось как структура, состоящая из

бесконечного сердечника. Как видно, результаты эксперимента несколько отличаются от значений, полученных из аналитического выражения.

На рисунке 1.9б для получения теоретической зависимости использовалась формула (1.8), оптическое волокно рассматривалось как трехслойная структура, в которой имеется сердечник с диаметром d_0 , оболочка с диаметром d_1 и защитная оболочка с диаметром d_2 .

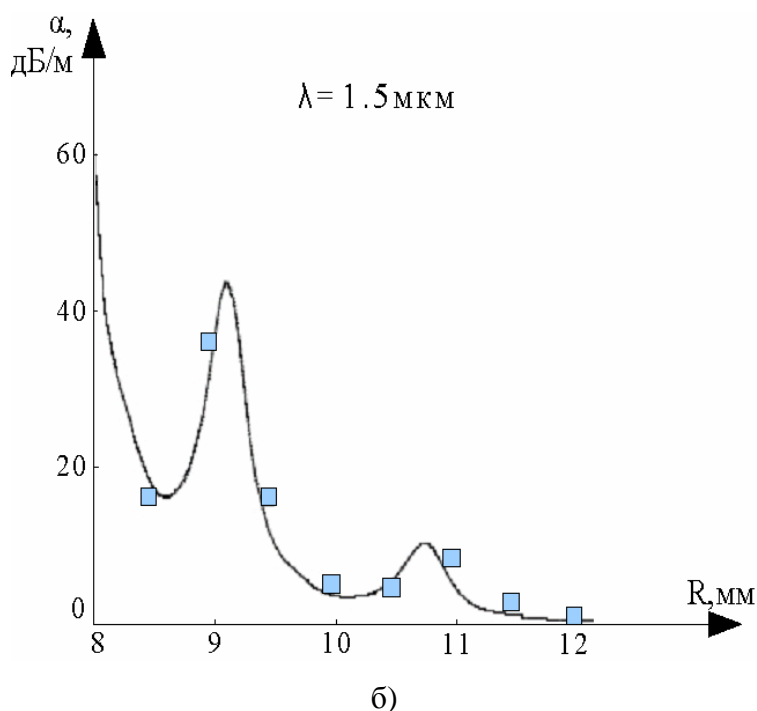
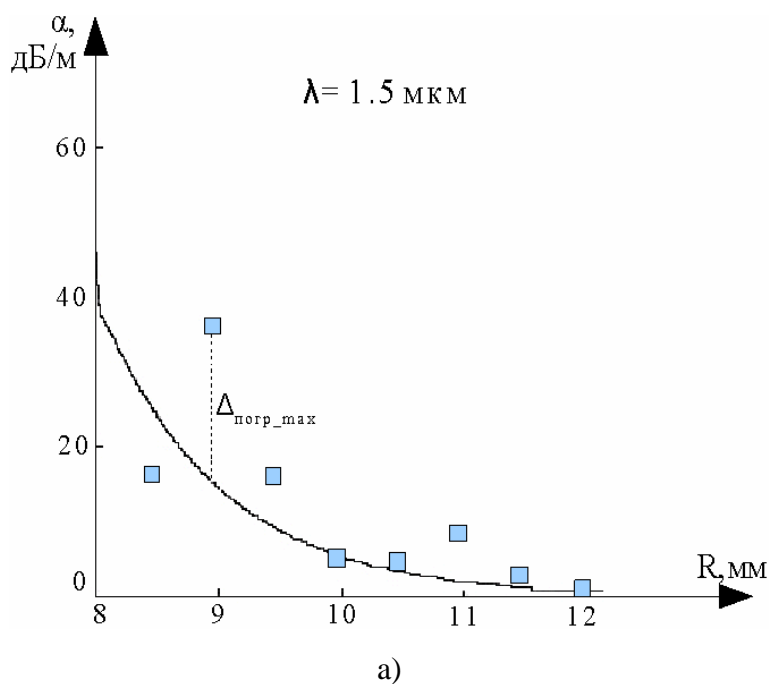


Рис.1.9 Зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ

Теоретическая зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ, представленная на рисунке 1.9б, лучше согласуется с результатами эксперимента, чем в случае, изображенным на рисунке 1.9а

Современные оптические волокна имеют, как правило, несколько защитных оболочек, которые не учитываются в выражении (1.8). Дальнейшие исследования, проводившиеся в направлении учета дополнительных защитных оболочек, показали, что их учет не оказывает существенного влияния на точность получаемой величины прироста затухания вследствие изгиба ОВ [20].

Результаты, полученные в ходе эксперимента и результаты, полученные из аналитического выражения для случая $\lambda = 1,6$ мкм, приведены на рисунке 1.10.

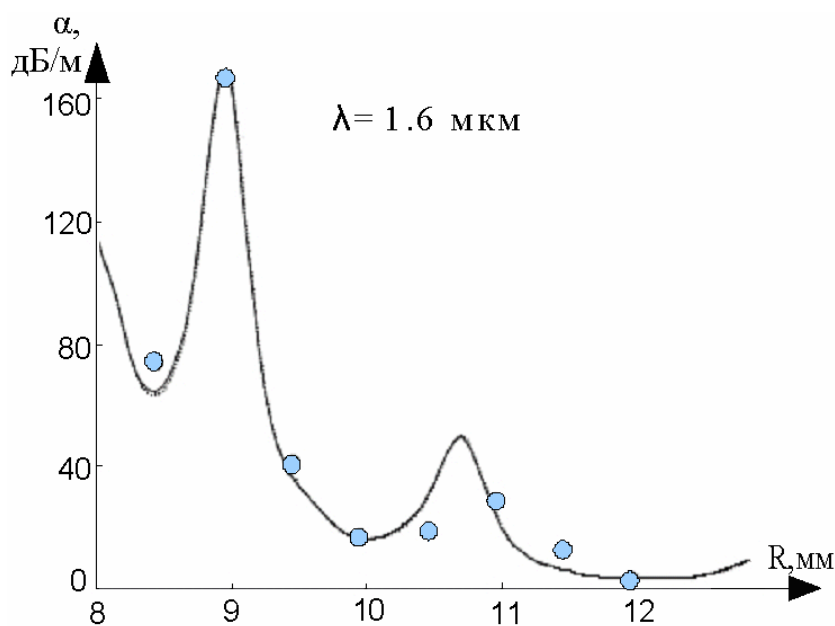


Рис.1.10 Зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ

Результаты, представленные на рисунках 1.9 и 1.10 показывают, что результаты, полученные из выражения (1.8) хорошо согласуются с результатами эксперимента. С помощью выражения (1.8) показан характер изменения зависимости величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ. Далее была проведена оценка величины погрешности

между результатами, полученными из выражения (1.8), и результатами эксперимента. Абсолютная погрешность величины прироста затухания $\Delta\alpha$ - есть разность между величиной прироста затухания, полученной из аналитического выражения, и величиной прироста затухания, полученной из эксперимента, при одинаковом значении радиуса изгиба ОВ:

$$\Delta(\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)) = \Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{аналит} - \Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{эксп}, \quad (1.9)$$

где $R_{изгиба}$ - радиус изгиба ОВ, [мм]; λ - длина волны оптического излучения, [мкм]; $\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{аналит}$ - прирост затухания оптического излучения, полученный из аналитического выражения, [дБ]; $\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{эксп}$ - прирост затухания оптического излучения, полученный из эксперимента, [дБ].

За истинное значение в данном случае принимается результат эксперимента. На практике часто используют не абсолютную, а относительную погрешность, которая есть отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta(\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)) = \frac{\Delta(\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda))}{\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{эксп}} \quad (1.10)$$

Подставив выражение (1.9) в выражение (1.10) и проведя дополнительные операции, получим величину относительной погрешности результатов аналитического выражения в процентах:

$$\delta(\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)) = \left| 100 - \frac{|\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{аналит} - \Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{эксп}|}{\Delta\alpha(R_{изгиба}, \lambda)_{эксп}} \cdot 100 \right| \quad (1.11)$$

Для каждой пары значений:

$$\begin{aligned}
&\Delta\alpha(R_{\min}, \lambda_{1.55})_{\text{эксперимент}}, \Delta\alpha(R_{\min}, \lambda_{1.55})_{\text{аналит}} \\
&\Delta\alpha(R_{\min} + 1, \lambda_{1.55})_{\text{эксперимент}}, \Delta\alpha(R_{\min} + 1, \lambda_{1.55})_{\text{аналит}} \\
&\dots\dots\dots \\
&\dots\dots\dots \\
&\Delta\alpha(R_{\max}, \lambda_{1.55})_{\text{эксперимент}}, \Delta\alpha(R_{\max}, \lambda_{1.55})_{\text{аналит}}
\end{aligned}$$

Была получена величина относительной погрешности. В итоге было получено, что для одномодового ОВ SMF 28:

$$\delta(\Delta\alpha(R_{\min}, R_{\max}))_{\max} = 15\%$$

Выводы к главе 1

Анализ методов получения оптического излучения с поверхности ОВ показал, что существующие методы можно условно разделить на 2 класса: 1) методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, не создающих в ОВ локальных неоднородностей; 2) методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, создающих в ОВ локальную неоднородность. Устройства, не создающие в ОВ локальных неоднородностей, трудно обнаруживаемы. В тоже время их непосредственная реализация и процесс подключения достаточно трудоемки и требуют дополнительных исследований. Среди устройств, создающих в ОВ локальную неоднородность, особое место занимают устройства, создающие макроизгиб ОВ. На рынке представлены технические средства, принцип действия которых построен на создании и использовании макроизгиба ОВ. Такие технические средства могут использоваться в качестве базы для создания устройств НСД. Исследование влияния макроизгиба на величину прироста затухания оптического излучения показало, что макроизгиб ОВ вносит постоянную во времени величину затухания, которая зависит от длины волны оптического излучения. Величина прироста затухания для $\lambda=1.6$ мкм может в более чем в 2 раза превосходить величину затухания для $\lambda=1.5$ мкм. В зависимости от типа ОВ, по которому осуществляется передача

информационных сигналов, зависимость $\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}})$ будет иметь различный вид, определяемый характеристиками ОВ. Наличие в оптическом кабеле запаса ОВ, технических средств, использующих в своей работе макроизгиб ОВ, предопределило необходимость исследования возможности обнаружения макроизгибов ОВ с помощью уже имеющихся методов и средств. По причине того, что ОСД по архитектуре отличаются от магистральных ВОЛС, необходимо исследовать возможность НСД через устройство, создающее макроизгиб ОВ, в различных участках ОСД, а также возможностей существующих средств и методик по их обнаружению.

Глава 2. Исследование и разработка системы обнаружения несанкционированных подключений в пассивных ОСД

2.1 Исследование возможностей систем мониторинга ВОЛС на базе оптического рефлектометра и контрольных сигналов в пассивных ОСД

Отличительной особенностью ОСД от магистральных ВОЛС является наличие оптических разветвителей, через которые осуществляется распределение входящего оптического сигнала с заданным отношением на N выходных направлений. Пассивные оптические сети доступа поддерживают следующие топологии [43]: 1) топология звезда, 2) топология дерево, 3) топология шина, что отражено на рисунке 2.1

В ОСД в оптическом сигнале со стороны ОЛО содержится информация для каждого ОСБ [2,3]. В том случае, если злоумышленник заинтересован в получении информации, предназначенной для ОСБ-1, см. рис.2.1а, несанкционированное подключение может быть осуществлено на участках оптический разветвитель-ОСБ-1, оптический разветвитель-ОСБ-2, оптический разветвитель-ОСБ- n . Таким образом, для обеспечения информационной безопасности требуется контролировать все маршруты прохождения информационных сигналов. В случае более сложной топологии увеличивается число участков, через которые может быть осуществлен НСД. В ОСД возможно проведение НСД без ухудшения характеристик принимаемых сигналов на стороне ОСБ- i . В ОСД, как и в магистральных ВОЛС для каждого маршрута должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} P_{пер} - P_{np-1} - \alpha_{раз-1} - \alpha_{н.раз-1} - \alpha_{ОВ-1} - \alpha_{разв-1} &> 0 \\ \dots & \\ P_{пер} - P_{np-i} - \alpha_{раз-i} - \alpha_{н.раз-i} - \alpha_{ОВ-i} - \alpha_{разв-i} &> 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $P_{пер}$ - уровень мощности передатчика на стороне ОЛО, [дБ]; P_{np-i} -

чувствительность приемника в i -м направлении, [дБ]; $\alpha_{раз-i}$ - суммарное затухание разъемных соединений в i -м направлении, [дБ]; $\alpha_{н.раз-i}$ - суммарное затухание неразъемных соединений в i -м направлении, [дБ]; $\alpha_{ОВ-i}$ - суммарное затухание ОВ в i -м направлении, [дБ]; $\alpha_{разв-i}$ - затухание, вносимое оптическим разветвителем в i -м направлении, [дБ].

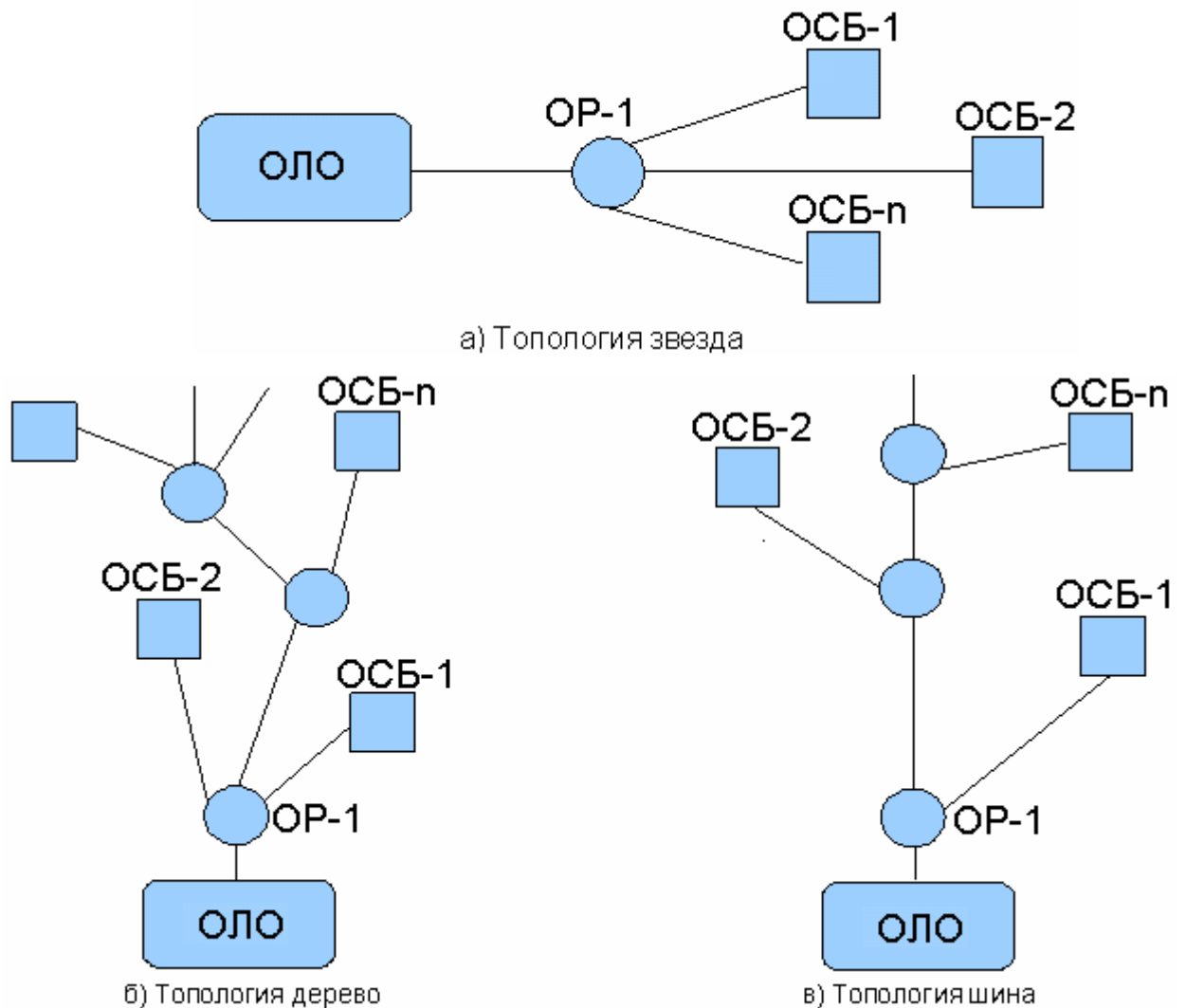


Рис.2.1 Топологии пассивных оптических сетей доступа

При этом на этапе проектирования закладывается дополнительный запас по мощности $\Delta\alpha_{запас}$ для компенсации роста потерь вследствие старения оптических компонентов, ухудшения характеристик приемо-передающего оборудования, восстановительных работ:

$$P_{пер} - P_{пр.-i} - \alpha_{сумм-i} - \alpha_{разв-i} - \Delta\alpha_{запас} > 0, \quad (2.2)$$

где $P_{пер}$ - уровень мощности передатчика на стороне ОЛО, [дБ]; $\alpha_{сумм-i}$ - суммарные потери в i -м направлении, [дБ]; $\alpha_{разв-i}$ - затухание, вносимое оптическим разветвителем в i -м направлении, [дБ].

Таким образом, из выражений 2.1 и 2.2 для каждого i -го направления ОСД получается значение $P_{пер}$. Так как в ОЛО для передачи информационного сигнала до каждого ОСД используется один передатчик, то условием работоспособности каждого направления ОСД будет:

$$\max(P_{пер-i}) \quad (2.3)$$

В тоже время в ОСД будет j -маршрут, для нормальной работы которого будет справедливо следующее:

$$\min(P_{пер-i}) \quad (2.5)$$

То есть, в j -м маршруте помимо запаса мощности для компенсации старения компонентов и др. будет избыточный уровень мощности оптического излучения $\Delta P_{\max-\min}$:

$$\Delta P_{\max-\min} = \max(P_{пер-i}) - \min(P_{пер-i}) \quad (2.6)$$

В настоящее время существуют несколько методов диагностики характеристик ВОЛС. Методы диагностики ВОЛС, при которых измеряются характеристики сигнала на стороне приемника, получили название методов диагностики волоконно-оптического тракта с анализом прошедшего сигнала. К этим методам относятся метод контрольных сигналов, измерение средней мощности оптических сигналов, анализ оптического спектра на приеме. Существует метод, получивший название метода диагностики волоконно-оптического тракта с анализом отраженного сигнала, в котором ключевым

блоком является оптический рефлектометр. В случае использования системы диагностики с анализом отраженного сигнала в ОВ вводится зондирующий импульс, мощность которого по мере прохождения по ОВ изменяется за счет потерь:

$$P_x = P_0 \cdot 10^{-0.1 \cdot \alpha \cdot x}, \quad (2.7)$$

Где P_0 - мощность зондирующего сигнала на входе в ОВ, [мВт]; P_x - мощность зондирующего сигнала в точке с координатой x , [мВт]; α - коэффициент затухания [дБ/км]; x - расстояние от начала волокна [км].

Потеря оптическим излучением части мощности происходит за счет поглощения излучения материалом ОВ и рассеяния на его неоднородностях, при этом зондирующий импульс рассеивается в любом сечении ОВ, а рассеянное излучение распространяется равномерно во все стороны. Это рассеяние называют рэлеевским и его невозможно устранить технологическими приемами при изготовлении ОВ. Это рассеяние является линейным, и доля рассеянного излучения не зависит от мощности зондирующего импульса при обычно используемых мощностях излучения. Проходящий по ОВ оптический импульс длительностью t_u одновременно вызывает рассеяние с участка ОВ протяженностью:

$$\Delta l = \frac{c \cdot t_u}{2 \cdot n_1}, \quad (2.8)$$

где c - скорость света в вакууме, [м/с]; n_1 - показатель преломления сердечника; t_u длительность импульса, [с].

Часть рассеянного излучения возвращается обратно к оптическому рефлектометру. Она определяется фактором обратного рассеяния G , который зависит от апертурных свойств ОВ.

Для мощности излучения, рассеянного с участка Δl , расположенного на расстоянии l от оптического рефлектометра, и пришедшего к его входу можно

записать:

$$P_r(l) = (P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l}{5}}) \cdot \alpha_r \cdot G \cdot \Delta l \cdot \alpha_{раз} \quad (2.9)$$

Где $P_r(l)$ - мощность рассеянного оптического излучения с участка Δl на входе оптического рефлектометра, [мВт]; G - фактор обратного рассеяния; α_r - коэффициент рэлеевского рассеяния; $\alpha_{раз}$ - коэффициент затухания, вносимый оптическим разветвителем в оптическом рефлектометре; P_0 - мощность зондирующего импульса на входе ОВ, [мВт]; α - затухание ОВ, [дБ]; l – расстояние до некоторой точки ОВ, [км]; Δl – длина участка, с которого происходит одновременное отражение зондирующего импульса, [м].

Представим выражение (2.9) в логарифмических единицах, тогда:

$$Y_r = 5 \cdot (\lg P_0 + \lg \alpha_{раз} + \lg \frac{\alpha_r \cdot G \cdot c \cdot t_{u0}}{2 \cdot n_1} + \lg \frac{t_u}{t_{u0}} - \alpha \frac{c \cdot t}{n_1}), \quad (2.10)$$

Где t_{u0} - длительность зондирующего импульса, при которой нормируется относительный уровень сигнала обратного рассеяния в ближней зоне волоконного тракта, [с];

Отсюда видно, что на уровень принятого рэлеевского сигнала на расстоянии l от оптического рефлектометра влияет длительность зондирующего импульса, его мощность на входе ОВ, а также величина вносимого оптическим разветвителем затухания.

Кроме рэлеевского рассеяния оптический сигнал может отражаться от локальных неоднородностей. Такой тип отражения носит название френелевского отражения. Мощность отраженного оптического импульса на локальной неоднородности определяется:

$$P_F = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l}{5}} \cdot R \cdot \alpha_{раз} \quad (2.11)$$

где P_F - мощность отраженного на неоднородности оптического излучения на входе оптического рефлектометра, [мВт]; R - коэффициент отражения от неоднородности.

Или, если представить в логарифмических единицах:

$$Y_F = 5 \cdot (\lg P_0 + \lg \alpha_{раз} + \lg R - \alpha \frac{c \cdot t}{n_1}) \quad (2.12)$$

Другой важной характеристикой оптического рефлектометра является динамический диапазон. Динамический диапазон оптического рефлектометра определяется как разность между уровнем мощности P_{S0} обратного рассеяния в самом начале волокна и определенным тем или иным способом уровнем шумов P_{NOIS} при заданном времени измерений в соответствии с формулой:

$$D = 5 \lg P_{S0} - 5 \lg P_{NOIS} \quad (2.13)$$

Динамический диапазон возрастает с увеличением мощности и длительности зондирующего сигнала, увеличения числа накоплений и времени измерения, а также с уменьшением уровня шума фотоприемного устройства (ФПУ). Уровень шума (порог реагирования) определяется параметрами ФПУ и может быть выражен в единицах оптической мощности P_{nor} или в логарифмических единицах Y_{nor} по отношению к некоторой мощности P_n , принятой за 0 дБ:

$$Y_{nor} = 5 \lg \frac{P_{nor}}{P_n} \quad (2.14)$$

Уровень шума ФПУ зависит от типа фотоприемника, коэффициента шума предварительного усилителя и от полосы пропускания ΔF усилителя ФПУ. Пороговая мощность может быть выражена через спектральную плотность шума $S_{ш}$, приведенную к входу ФПУ:

$$P_{nor} = S_{ui} \cdot \Delta F \quad (2.15)$$

Полоса пропускания ΔF ФПУ выбирается исходя из допустимых искажений отраженных от неоднородностей ОВ оптических импульсов на выходе ФПУ. Причем, между длительностью импульса t_u и требуемой полосой пропускания ΔF существует обратно пропорциональная зависимость. Полагая, что известен порог реагирования $P_{пор0}$ ФПУ для длительности импульса, при которой нормируется относительный уровень сигнала обратного рассеяния в ближней зоне ОВ, т. е. при $t_u=1$ нс, можно записать порог реагирования ФПУ для любой длительности импульса:

$$P_{nor} = P_{пор0} \cdot \sqrt{\frac{t_{u0}}{t_u}} \quad (2.16)$$

Для увеличения отношения сигнала к шуму, а, следовательно, и для увеличения динамического диапазона используют накопление сигнала обратного рассеяния на выходе ФПУ. Накопление или усреднение сигнала в каждой точке рефлектограммы эквивалентно многократным измерениям с последующим расчетом среднего значения. Это справедливо при проведении измерений при одинаковых условиях. За оценку истинного значения измеряемой величины $\hat{P}(l_1)$ принимается выборочное среднее значение $\bar{P}(l_1)$ (среднее арифметическое по данной выборке):

$$\hat{P}(l_1) = \bar{P}(l_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(l_1) \quad (2.17)$$

В качестве оценки случайной погрешности среднего значения $\bar{P}(l_1)$ принимается выборочное стандартное отклонение среднего арифметического (среднеквадратичная погрешность среднего арифметического):

$$S_{\bar{P}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n [P_i(l_1) - \bar{P}(l_i)]^2} \quad (2.18)$$

Отношение сигнала к шуму возрастает при этом в корень из N раз, где N – число накоплений (измерений) в одной точке. С учетом сказанного, для порога реагирования в логарифмических единицах можно записать:

$$Y_{nor} = 5 \lg\left(\frac{P_{nor0}}{P_n}\right) + 2.5 \lg\left(\frac{t_u}{t_{u0}}\right) - 2.5 \lg(N) \quad (2.19)$$

В итоге получим:

$$D = 5 \lg\left(\frac{P_{nor0}}{P_n}\right) + Y_{s0} + 7.5 \lg\left(\frac{t_u}{t_{u0}}\right) + 2.5 \lg(N) - \alpha_{разв} \quad (2.20)$$

Рефлектограмма на маршруте от ОЛО до первого разветвителя будет мало отличаться от той, которую можно увидеть на магистральной ВОЛС с топологией точка-точка, рис 2.2:

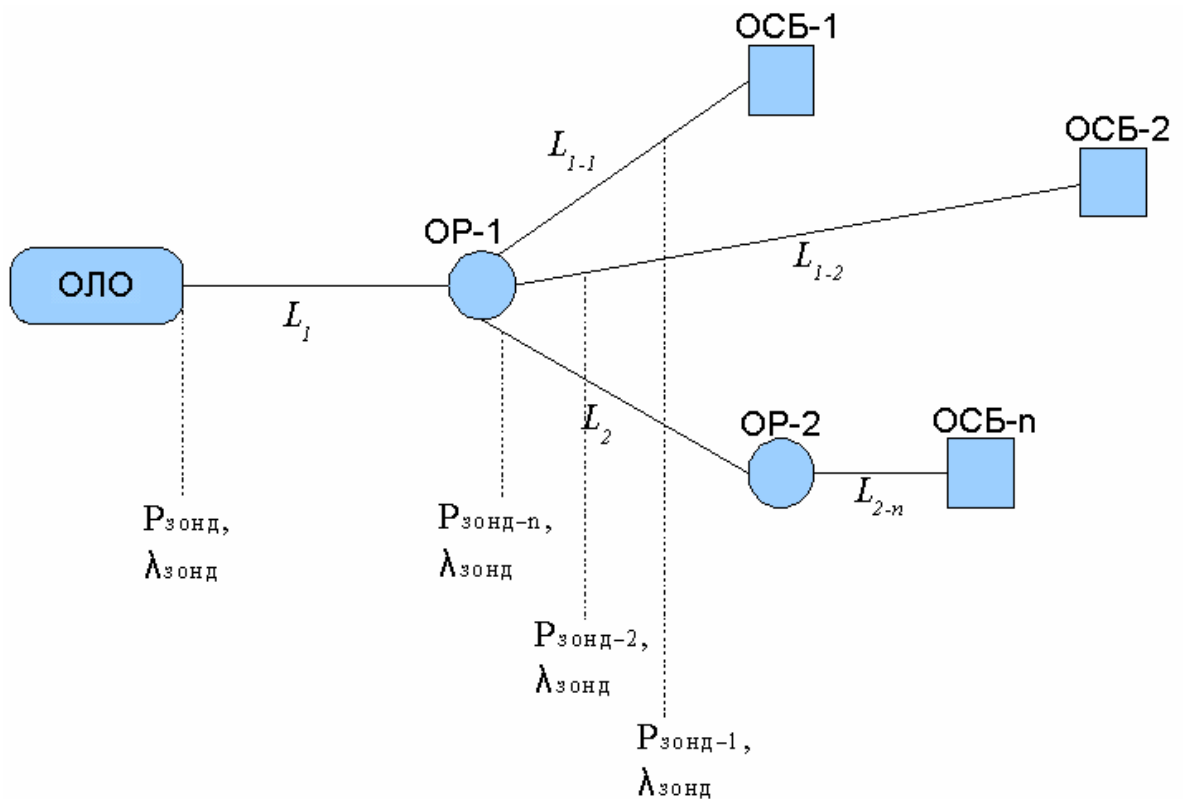


Рис.2.2 Метод диагностики с анализом отраженного сигнала на сети с оптическими разветвителями

Перед входом в оптический разветвитель ОР-1 зондирующий сигнал будет иметь мощность в соответствии с формулой:

$$P(L_1) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_1}{10}} \quad (2.21)$$

Пройдя ОР-1, зондирующий сигнал разделится на n -зондирующих сигналов меньшей мощности, которая будет определяться коэффициентом ответвления в i -м направлении $K_{отв-i}$:

$$P_{вых.разв1}(L_1) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_1}{10}} \cdot K_{отв.L_1-1} \quad (2.22)$$

$$P_{вых.разв2}(L_2) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_2}{10}} \cdot K_{отв.L_2}$$

...

$$P_{вых.развn}(L_n) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_n}{10}} \cdot K_{отв.L_n} \quad (2.23)$$

При этом мощность принятого отраженного рэлеевского сигнала i -го направления будет определяться:

$$P_r(l_i) = (P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l_i}{5}}) \cdot \alpha_r \cdot G \cdot \Delta l \cdot \alpha_{разв.ОР} \cdot K_{отв-i} \quad (2.24)$$

На итоговой рефлектограмме будут отражены все неоднородности, выявленные по мере прохождения зондирующего сигнала по всем маршрутам от ОЛО до ОСБ. При этом могут возникнуть следующие сложности:

1) рефлектограмма будет иметь более сложный вид за счет большего числа элементов сети, точек отражения, участков затухания зондирующего сигнала;

2) в случае появления неоднородности на одном из участков, лежащим за оптическим разветвителем, повышается вероятность принятия ошибочного решения о характере и величине неоднородности. Это связано с тем, что на входе оптического рефлектометра будет суммарный отраженный рэлеевский

сигнал N направлений, которые имеют одинаковые диапазоны протяженности от точки, где установлен оптический рефлектометр до места рассеяния:

$$P_r(l) = \sum_{n=1}^N P_{r-n}(l) \quad (2.25)$$

3) в том случае, если расстояние от оптического разветвителя до двух различных ОСБ будет примерно одинаковым, также может возникнуть неопределенность на каком из маршрутов от ОЛО до ОСБ возникла неоднородность;

4) Для получения рефлектограммы требуется длительное время, в которое отсутствует информация о текущем состоянии ВОЛС. В это время, например, может произойти кратковременное подключение устройства НСД к ОВ для идентификации активных волокон в оптическом кабеле. Кратковременное подключение может никак не отразиться на итоговой рефлектограмме;

5) требования, предъявляемые к характеристикам рефлектометра для работы в ОСД, в силу представленных выше пунктов должны быть выше.

В случае использования системы диагностики ВОЛС с анализом характеристик прошедшего оптического сигнала будет наблюдаться другая картина. Информационный сигнал со стороны ОЛО достигает первого разветвителя ОР-1, см. рисунок 2.2. Пройдя оставшийся путь оптический сигнал попадает на вход каждого ОСБ, в которых в наиболее простом случае измеряется мощность принятого сигнала через интервалы времени Δt . Так мощность зондирующего сигнала на входе ОСБ-1 будет:

$$P_{ОСБ-1} = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_1}{10}} \cdot K_{отв-1} \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L_{1-1}}{10}} \cdot \alpha_{разв.ОСБ-1}, \quad (2.26)$$

где $\alpha_{разв.ОСБ-1}$ - коэффициент затухания разветвителя на входе ОСБ-1.

Очевидно, что мощность зондирующего сигнала на входе ОСБ больше величины обратнорассеянного рэлеевского сигнала на входе оптического рефлектометра:

$$P_{OCB-1} \gg P_r(L_1 + L_{1-1}) \quad (2.27)$$

Это утверждение будет справедливо и для всех других конечных участков сети доступа ОСД. По причине того, что характеристики волоконно-оптического тракта квазипостоянны и мощность принятого зондирующего сигнала превышает уровень шумов, будет справедливо следующее:

$$\hat{P}_{OCB-1} = \bar{P}_{OCB-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{OCB-1-i} \cong \sum_{i=1}^1 P_{OCB-1-i} \quad (2.28)$$

При этом отсутствует проблема расстояния от оптического разветвителя до сетевого блока, так как исследуется не отраженный, а принятый сигнал, мощность которого значительно превышает мощность обратнорассеянного импульса. В сравнении с методом оптической рефлектометрии здесь отсутствует проблема времени, в течение которого один или несколько маршрутов прохождения оптического сигнала находится в незащищенном состоянии.

Способ анализа характеристик прошедшего сигнала применим на всех топологиях, его характеристики не ухудшаются при более сложных топологиях сетей по причине того, что маршрут следования анализируемых сигналов совпадает с маршрутами информационных сигналов.

Недостатком данного способа является отсутствие информации о месте возникновения неоднородности и характере неоднородности, вследствие которого увеличилось затухание.

2.1 Архитектура и основные принципы работы системы обнаружения НСД

При передаче сигнала по оптическому волокну на принимающей стороне наблюдается уменьшение мощности принятого сигнала, вызванное следующими причинами: отражение и поглощение оптического сигнала на неоднородностях, потери на разъёмных и неразъёмных соединениях, потери при прохождении сигнала через оптический разветвитель и др. Затухание

$\alpha_{общ-i}$ в i -м направлении определяется:

$$\alpha_{общ-i} = \alpha \cdot L_i + k_{н-i} \cdot \alpha_n + k_{р-i} \cdot \alpha_p + \alpha_{разв-i}, \quad (2.29)$$

где α - километрическое затухание ОК, [дБ/км]; α_n, α_p - затухание в неразъемных и разъемных соединениях, [дБ]; L_i - длина ОК в i -м направлении, [км]; $\alpha_{разв-i}$ - затухание, вносимое оптическим разветвителем в i -м направлении, [дБ]; $k_{н-i}, k_{р-i}$ - количество неразъемных и разъемных соединений в i -м направлении.

На рисунке 2.3 показано, что на выходе ОЛО мощность оптического сигнала равнялась P_1 . По мере прохождения по ОВ сигнал затухает, что отражено в точке перед входом в оптический разветвитель. Как видно из рисунка, уровень мощности в этой точке $P_2 < P_1$. После прохождения оптического разветвителя наблюдается очередное уменьшение оптической мощности, обусловленное тем, что оптический разветвитель делит входящий оптический сигнал на несколько выходящих. На входе ОСБ вновь наблюдается уменьшение мощности оптического сигнала, обусловленное тем, что сигнал после оптического разветвителя распространялся по ОВ, проходил другие оптические разветвители, теряя мощность.

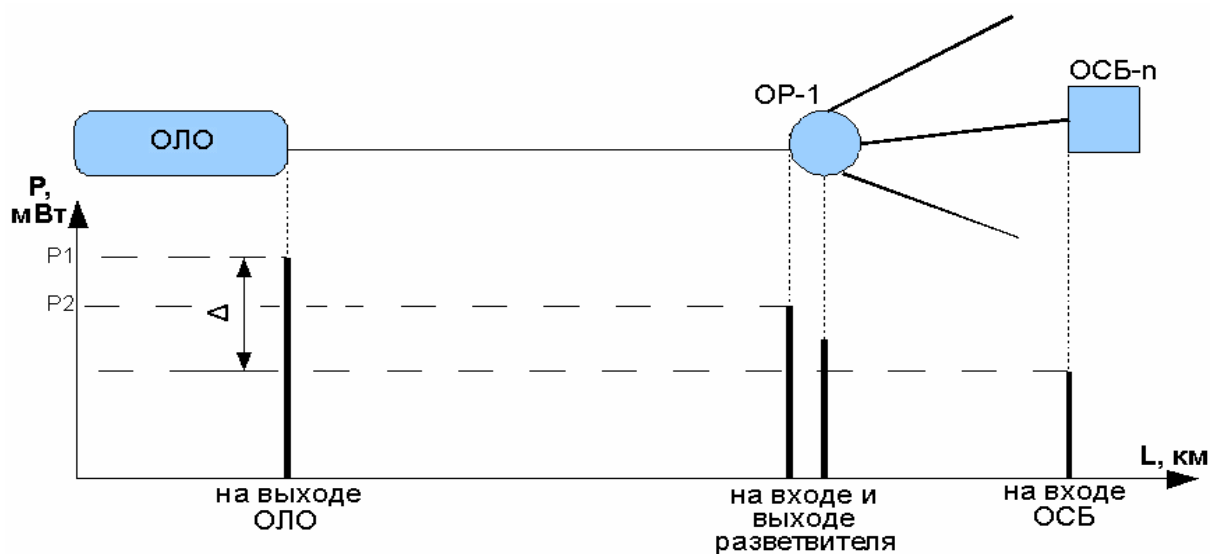


Рис.2.3 Уменьшение мощности оптического сигнала по мере прохождения в ОСД

В случае, если к оптическому волокну производится несанкционированное подключение с помощью технических средств, создающих макроизгиб ОВ, то на принимающей стороне наблюдается рост затухания, что показано на рисунке 2.4.

Перед входом в устройство НСД, см. рисунок 2.4, наблюдается уменьшение мощности передаваемого сигнала, вызванное естественными причинами. Устройство НСД за счет изгиба оптического волокна с некоторым радиусом R , создает в ОВ неоднородность, на которой для оптического сигнала с длиной волны λ происходит потеря части мощности $P_{устр.НСД}(\lambda, l)$:

$$P_{устр.НСД}(\lambda, l) = P_{вх.НСД}(l, \alpha) \cdot K_{НСД}(R_{изгиба}, \lambda) \quad (2.30)$$

Где $P_{вх.НСД}(l, \alpha)$ - мощность оптического излучения перед входом в устройство НСД; $K_{НСД}(R_{изгиба}, \lambda)$ - коэффициент потерь вследствие макроизгиба ОВ;

Часть оптической мощности $P_{устр.НСД}(\lambda, l)$, рассеянной на неоднородности, попадает на вход устройства НСД:

$$P_{пр.НСД}(\lambda) = P_{устр.НСД}(\lambda) \cdot K_{сбора}, \quad (2.31)$$

где $K_{сбора}$ - коэффициент, определяющий какая часть мощности рассеянная на неоднородности попадает на вход приемника устройства НСД.

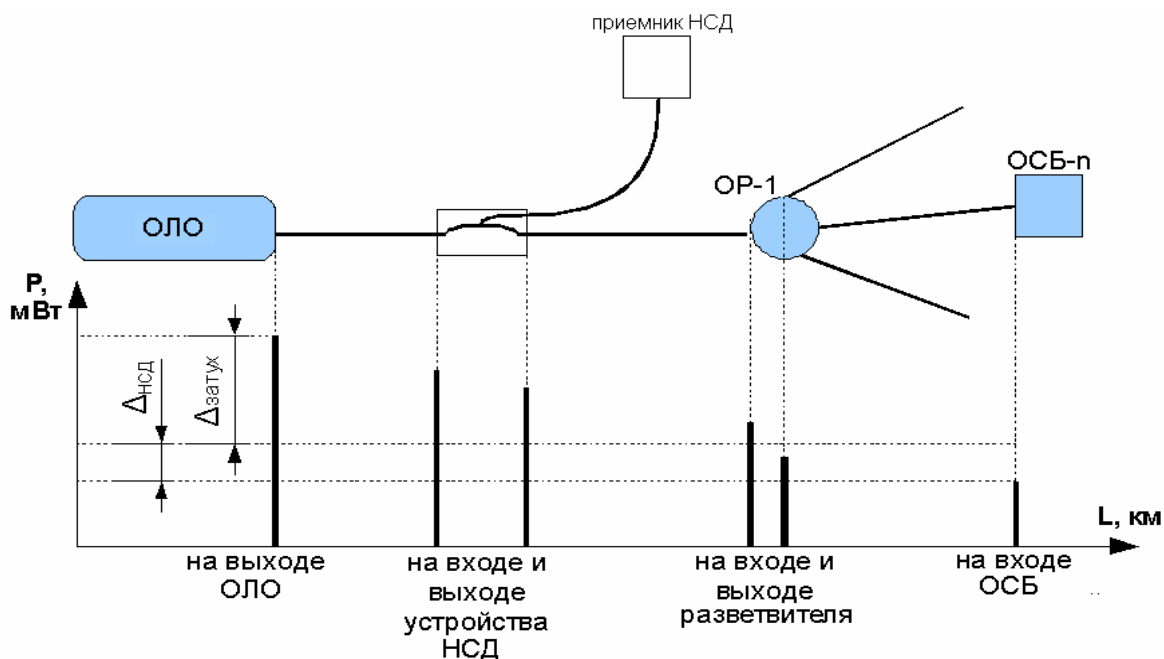


Рис.2.4 Уменьшение мощности оптического сигнала на входе ОСБ вследствие НСД

На выходе устройства НСД наблюдается уменьшение мощности оптического излучения по сравнению с мощностью входе. В связи с появлением в ОСД устройства НСД на входе оптического разветвителя мощность оптического сигнала стала меньше в сравнении со случаем, изображенным на рисунке 2.3. Уменьшение мощности сигнала также, наблюдается и на входе оптического сетевого блока. Таким образом, общее затухание на участке ОЛО-ОСБ..._n в случае НСД имеет следующий вид:

$$\alpha_{общ} = \alpha_{безНСД} + \Delta\alpha_{НСД} \quad (2.32)$$

Рассмотрим возможность обнаружения макроизгиба с радиусом изгиба $R_{изгиба1}$ на расстоянии $L_{изгиба1}$ системой обнаружения несанкционированных подключений (СОНП) на базе оптического рефлектометра. В том случае, если макроизгиб возник на участке L_1 , см. рис. 2.2, то на расстоянии Δl от него уровень рэлеевского сигнала на входе оптического рефлектометра определяется следующим выражением:

$$Y_r = 5 \cdot (\lg P_0 + \lg \alpha_{разв} + \lg \frac{\alpha_r \cdot G \cdot c \cdot t_{u0}}{2 \cdot n_1}) + \lg \frac{t_u}{t_{u0}} - \alpha(L_{изгиба1} + \Delta l) \quad (2.33)$$

Как было показано в 1-й главе, в месте возникновения макроизгиба наблюдается рост оптических потерь, при этом уменьшается мощность рассеянного сигнала:

$$Y_r = 5 \cdot [\lg P_0 + \lg \alpha_{разв} + \lg \frac{\alpha_r \cdot G \cdot c \cdot t_{u0}}{2 \cdot n_1} + \lg \frac{t_u}{t_{u0}} - \alpha(L_{изгиба1} + \Delta l) + \lg(\alpha(R_{изгиба1}))] \quad (2.34)$$

На практике в оптическом рефлектометре используется не одна длина волны зондирующего импульса, а две. При этом получение рефлектограмм с помощью зондирующих импульсов на двух длинах волн могут проводиться во времени как последовательно, так и параллельно. В результате для каждой неоднородности в ОВ будет получена пара значений: $Y_{r-1.55}(l_i), Y_{r-1.625}(l_i)$. Для точки, соответствующей макроизгибу, величина

$$\frac{Y_{r-1.55}(l_i)}{Y_{r-1.625}(l_i)} > 1 \quad (2.35)$$

В том случае, если в оптическом рефлектометре используется зондирующий импульс на одной длине волны, точка рефлектограммы, соответствующая макроизгибу ОВ, напоминает место сварки оптических волокон. При использовании зондирующего импульса на второй длине волны в месте макроизгиба может наблюдаться значительное отличие уровня обратного рассеяния двух зондирующих сигналов, что характерно для макроизгиба ОВ.

Рассмотрим случай, при котором на участке L_{1-2} , см. рис. 2.2 возник макроизгиб с радиусом изгиба $R_{изгиба2}$ на расстоянии $L_{изгиба2}$ от оптического рефлектометра. Возможен случай, когда:

$$\begin{aligned}
L_{1-2} &= L_{изгиба2} + \Delta L_{1-2} \\
L_{1-1} &= L_{изгиба2} + \Delta L_{1-1} \\
..... \\
L_{1-n} &= L_{изгиба2} + \Delta L_{1-n}
\end{aligned}$$

Это приводит к тому, что на входе оптического рефлектометра уровень рассеянного рэлеевского сигнала на расстоянии $L_{изгиба2}$ от оптического рефлектометра будет определяться так:

$$Y_r(L_{изгиба2}) = Y_r(L_{изгиба2})_{1-1} + Y_r(L_{изгиба2})_{1-2} + \dots + Y_r(L_{изгиба2})_{1-n} \quad (2.36)$$

В том случае, если макроизгиб возникает в одной из ветвей ОСД, расположенной за оптическим разветвителем, анализ рефлектограммы не дает однозначного ответа о направлении, в котором он возник. Для обнаружения макроизгиба может потребоваться от десятка секунд до нескольких минут, что также является недостатком.

Рассмотрим случай, при котором со стороны ОЛО через заданные интервалы времени Δt передается контрольный сигнал λ_1 . В том случае, если макроизгиб возник на участке L_1 , это повлечет уменьшение мощности всех передающихся сигналов на стороне каждого ОСБ. При этом:

$$P_{ОСБ-i}(\lambda_1) = P_{ОСБ.безНСД-i} \cdot K_{изгиба}(\lambda_1, R_{изгиба}), \quad (2.37)$$

где $P_{ОСБ.безНСД-i}$ - мощность контрольного сигнала на входе ОСБ; в случае отсутствия макроизгиба, [мВт]; $K_{изгиба}(\lambda_1, R_{изгиба})$ - коэффициент затухания вследствие макроизгиба, зависящий от длины волны и радиуса изгиба ОВ.

Рост затухания как контрольного, так и информационных сигналов будет наблюдаться одновременно на всех ОСБ_i. В том случае, если макроизгиб ОВ возникает на участке L_{1-1} , см. рис.2.2, рост затухания контрольного и информационного сигналов будет наблюдаться только лишь на стороне ОСБ₁.

При этом величина прироста затухания для сигнала будет определяться

длиной волны оптического сигнала и радиусом изгиба ОВ. Если радиус изгиба ОВ не превысит критичной для данного участка величины, его появление не отразится на коэффициенте ошибок информационно сигнала. У контрольного сигнала на стороне ОСБ₁ будет зафиксировано уменьшение мощности, т.е. рост затухания. По величине прироста затухания контрольного сигнала невозможно однозначно установить причину, вызвавшую рост затухания. Причиной роста затухания может быть уменьшение выходной мощности источника оптического излучения контрольного сигнала, рост затухания в ОВ, ухудшение характеристик приемника контрольного сигнала. Чтобы исключить вероятность принятия ошибочного решения вследствие уменьшения мощности источника контрольного сигнала на стороне ОЛЮ через оптический разветвитель потребуется подключить аналогичный измеритель оптической мощности. В случае изменения характеристик передатчика оптической мощности это незамедлительно отразится на обоих измерителях. Таким образом, уменьшение мощности контрольного сигнала может быть вызвано как изменением характеристик ВОЛС, так и изменением характеристик оптического приемника. Чтобы исключить вероятность того, что уменьшение мощности контрольного сигнала вызвано изменением характеристик оптического приемника, можно использовать второй контрольный источник оптического излучения λ_2 с двумя измерителями оптической мощности. Тем самым на входе каждого ОСБ в реальном времени можно оценивать состояние ветви ОСД путем непрерывного или периодического измерения мощности двух контрольных сигналов. Вследствие того, что характеристики ВОЛС квазипостоянны, одновременная передача двух контрольных сигналов приведет к тому, что одновременное изменение мощности контрольных сигналов на входе ОСБ будет свидетельствовать об изменении состояния ВОЛС, которое может быть вызвано старением компонентов, внешними воздействиями или несанкционированными подключениями.

Основными задачами, стоящими перед системой обнаружения НСД

являются:

- 1) быстрое и точное отслеживание изменение характеристик ВОЛС;
- 2) определение причин, вызвавших изменение одной или нескольких характеристик;
- 3) оперативное реагирование.

Этим требованием удовлетворяет система обнаружения, структурная схема которой представлена на рисунке 2.5. На рисунке 2.5 представлены основные элементы системы обнаружения НСД в ОСД:

1. подсистема диагностики состояния ВОЛС;
2. подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС;
3. подсистема управления.

Подсистема мониторинга состояния ВОЛС-1 в реальном времени или через заданные интервалы времени измеряет уровни мощности двух контрольных сигналов на входе ОСД. В первой главе было установлено, что при фиксированном радиусе изгиба ОВ величина прироста затухания будет больше у оптического излучения с большей длинной волны. В том случае, если длины волн контрольных сигналов будут находиться в области 1.5 и 1.6 мкм, даже малые радиусы изгиба ОВ приведут к значительному увеличению прироста затухания сразу двух контрольных сигналов. Подсистема мониторинга состояния ВОЛС-2 представляет собой оптический рефлектометр, с помощью которого устанавливается координата неоднородности или макроизгиба ОВ.

Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС необходима для того, чтобы с помощью математических методов и алгоритмов проводить обработку и анализ получаемых от подсистемы диагностики состояния ВОЛС данных с целью выявления отклонений и вынесения решения о причинах, вызвавших отклонение.

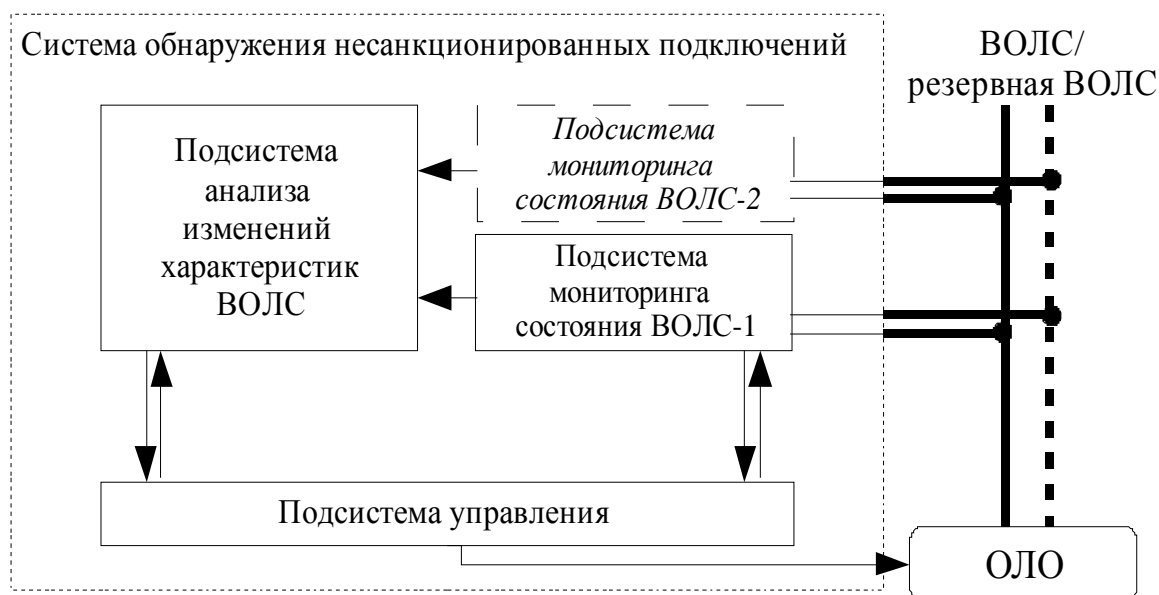


Рис.2.5 Структурная схема системы обнаружения НСД

Подсистема управление служит для синхронизации и управления работой подсистем мониторинга состояния ВОЛС-1, ВОЛС-2 и подсистемы анализа изменений характеристик ВОЛС.

Особенностью системы обнаружения НСД, представленной на рисунке 2.5, является модульный принцип построения. Это обусловлено следующими причинами: 1) в случае пассивных оптических сетей доступа имеется возможность использовать систему диагностики самого передающего оборудования. Тем самым уменьшается количество блоков системы обнаружения, что в конечном итоге отражается на стоимости системы обнаружения; 2) в настоящее время технологии пассивных ОСД продолжают развиваться, появляются новые технологии реализации ОСД. Используя модульный принцип построения, оператор связи может легко интегрировать уже имеющуюся систему в ОСД нового поколения без дополнительных затрат; 3) модульный принцип построения позволяет производить своевременную модернизацию старых блоков на новые с лучшими характеристиками.

Система обнаружения несанкционированных подключений работает следующим образом, см. рис 2.6. В пассивной ОСД с помощью информационных или дополнительных контрольных сигналов подсистема

диагностики состояния ВОЛС осуществляется мониторинг затухания двух контрольных сигналов в каждом из направлений от ОЛО к ОСБ-1, ОСБ-2, ... ОСБ-п. Для этого со стороны ОЛО осуществляется одновременная передача двух контрольных сигналов λ_1, λ_2 . На входе ОСБ измеряют уровень мощности каждого контрольного сигнала, после чего информация о времени измерения и уровнях мощности контрольных сигналов передается на сторону ОЛО, где записывается в БД. Программа анализа данных вычисляет прирост затухания каждого контрольного сигнала, после чего проверяет, является ли причиной роста затухания контрольных сигналов макроизгиб ОВ.

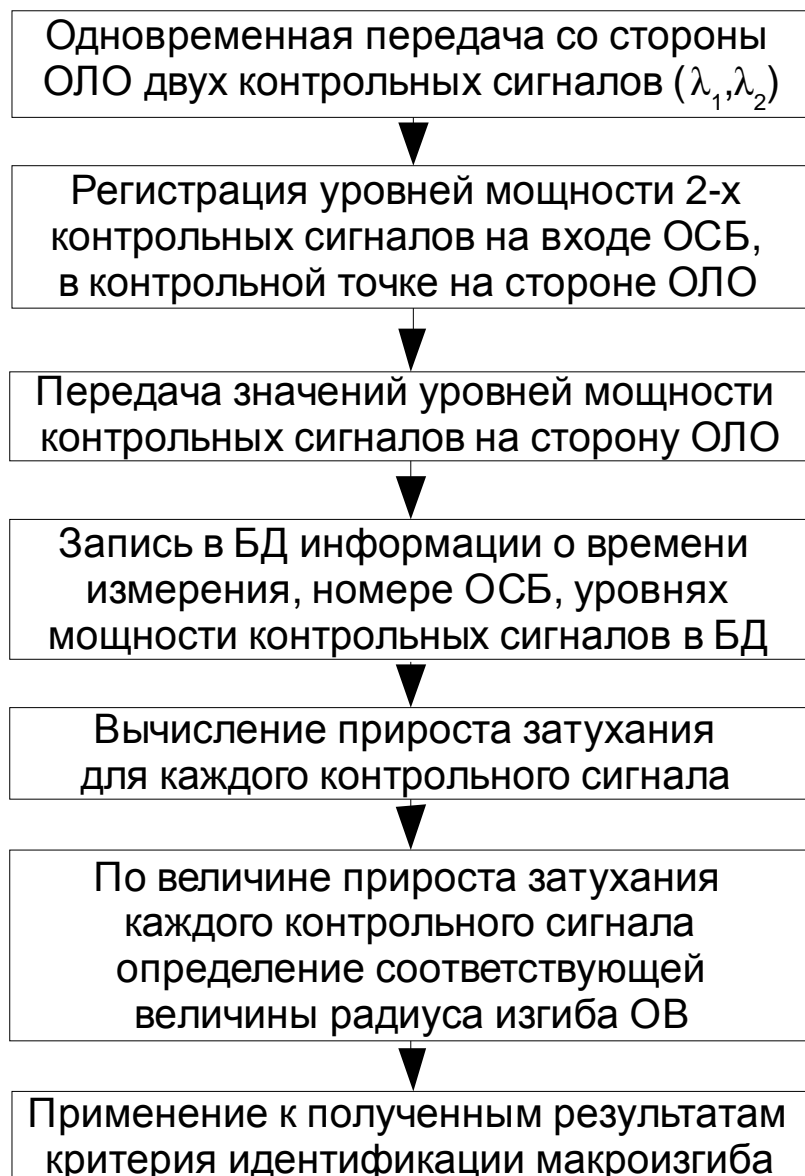


Рис.2.6 Методика мониторинга затухания в ОСД

База данных представляет собой набор таблиц, каждая из которых предназначена для хранения информации о значениях контролируемых характеристик ВОЛС. Для каждого ОСБ заведена как минимум одна таблица, состоящая из трех столбцов. В первый столбец заносится время измерения, во второй и третий уровни мощности контрольных сигналов на входе ОСБ или величина прироста затухания, что отражено на рисунке 2.7.

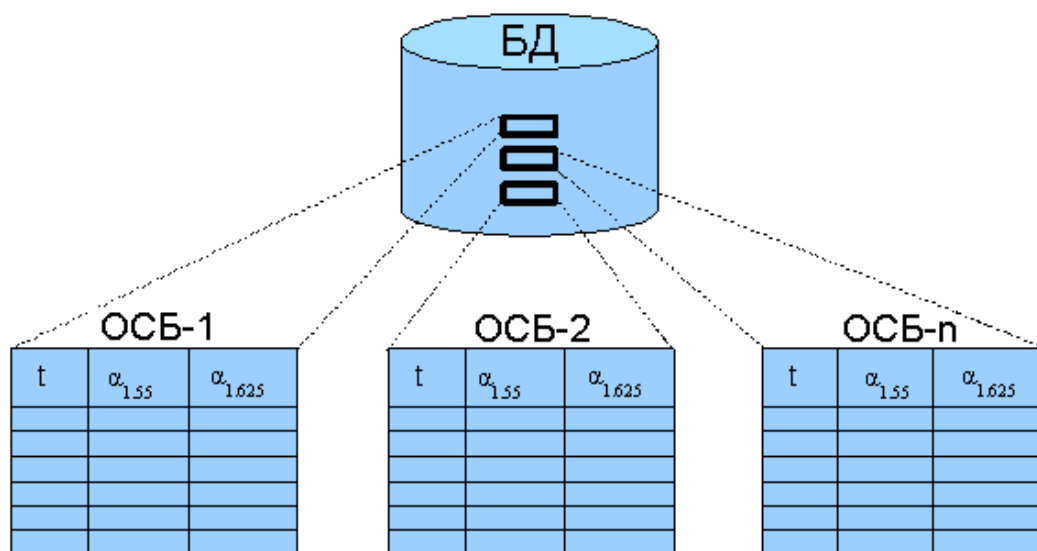


Рис.2.7 Хранения информации, получаемой от подсистемы диагностики ВОЛС

Параллельно с внесением в базу данных информации о времени измерения и значениях затухания контрольных сигналов программа анализа данных производит обработку данных из таблиц. В программе анализа данных используются алгоритмы и критерии, с помощью которых выявляются факты отклонения исследуемых характеристик от нормы и устанавливаются причины, вызвавшие отклонение, это показано на рисунке 2.8.

В случае выявления отклонения и определения, что отклонение с большой долей вероятности вызвано НСД с ОВ, программа выполняет одно из ранее установленных действий.

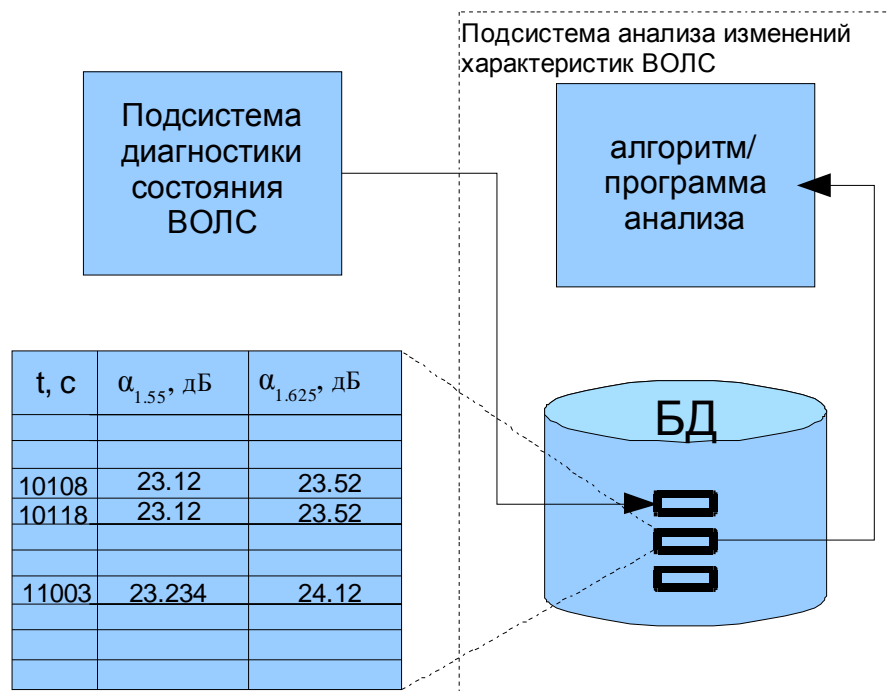


Рис.2.8 Иллюстрация работы подсистемы диагностики состояния ВОЛС и подсистемы анализа изменений характеристик ВОЛС

К достоинствам системы обнаружения, представленной на рисунке 2.5, следует отнести: 1) ее тесную интеграцию с архитектурой ОСД; 2) модульный принцип построения; 3) наличие базы данных, которая позволяет хранить значения измеряемых характеристик за определенный интервал времени; 4) наличие программ и алгоритмов, что позволяет со временем их заменять на более совершенные; 5) возможность резервирования системы обнаружения и данных хранящихся в ней; 6) возможность использования бесплатного ПО для полного построения системы обнаружения, что приводит к снижению стоимости готового решения.

К недостаткам нового способа следует отнести большее число элементов, входящих в систему обнаружения НСД, для установления координаты до неоднородности или макроизгиба ОВ необходимо использовать оптический рефлектометр.

Реализация системы обнаружения НСД с ОВ в ОСД представлена на рисунке 2.9.

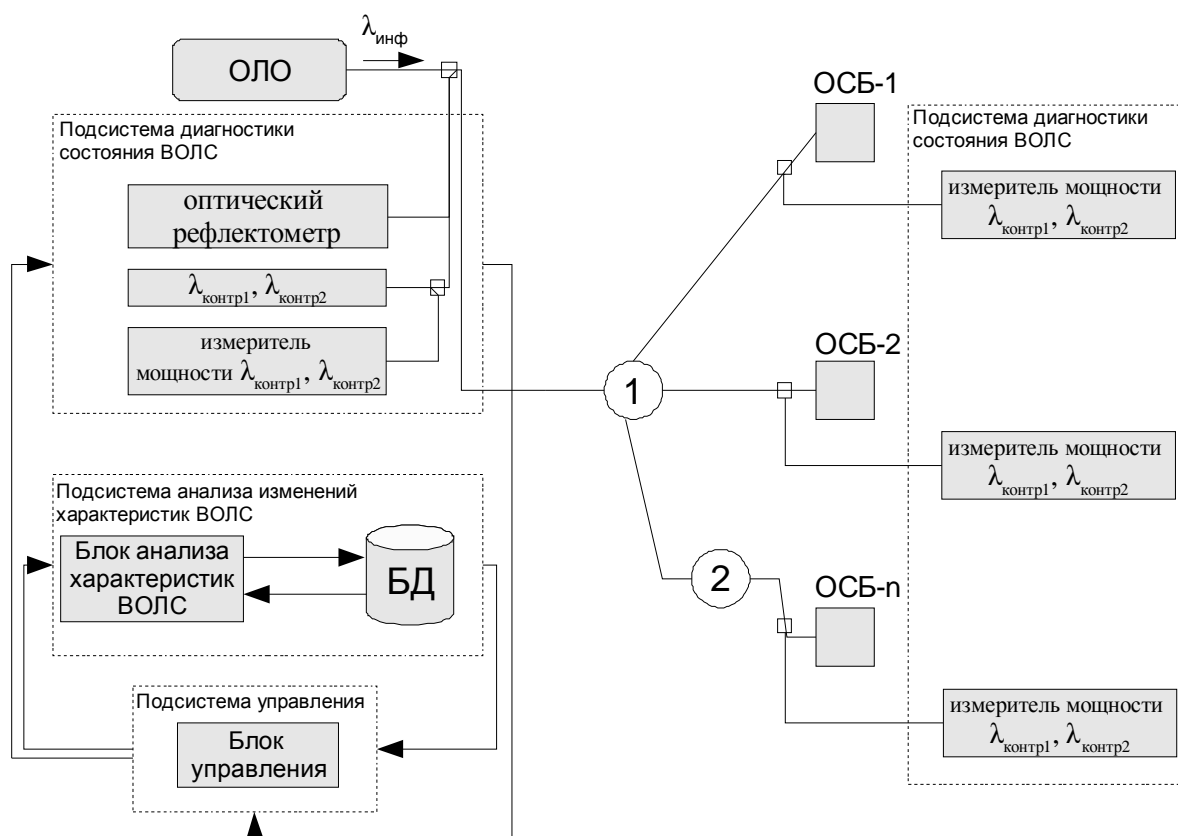


Рис.2.9 Система обнаружения НСД в ОСД

2.2 Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС

Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС является вторым ключевым элементом в системе обнаружения НСД. Она выполняет сразу две функции:

- 1) Хранение всей информации, поступающей от подсистемы диагностики состояния ВОЛС-1, ВОЛС-2;
- 2) Обработка информации с целью определения причин, вызвавших изменение наблюдаемых характеристик контрольных сигналов.

В связи с этим к данной системе должны предъявляться особые требования:

- 1) требование к скорости обработки информации;
- 2) стабильность работы;
- 3) отказоустойчивость;
- 4) совершенство алгоритмов обработки информации;

5) возможность точного определения причин, вызвавших отклонение.

Перечисленным выше требованиям удовлетворяет система анализа изменений характеристик ВОЛС на базе ЭВМ, приведенная на рисунке 2.10

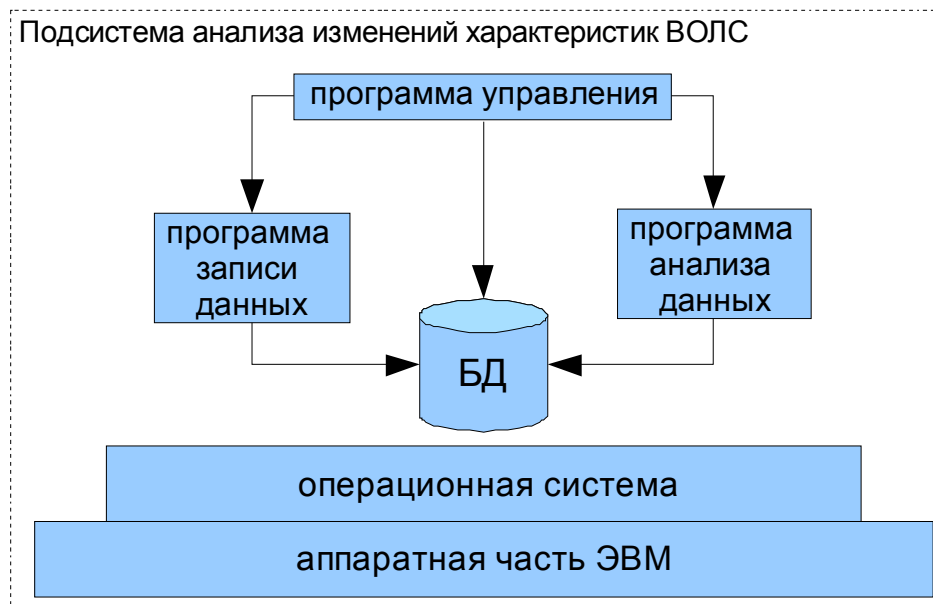


Рис.2.10 Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС

Основой системы анализа изменений характеристик ВОЛС является ЭВМ и ее аппаратная часть: процессор, оперативная память, объем дисковой подсистемы и др. Выбор ЭВМ обусловлен следующими причинами:

- 1) высокая производительность современной вычислительной техники;
- 2) высокая надежность;
- 3) возможность модернизации системы с целью повышения производительности;
- 4) относительно низкая стоимость комплектующих;
- 5) возможность решения с помощью ЭВМ самого разнообразного рода дополнительных прикладных задач.

Дополнительным преимуществом применения ЭВМ для построения системы анализа изменений характеристик ВОЛС является необходимость разработки только программного обеспечения, необходимость разработки аппаратной части отпадает. Все перечисленное выше влияет на время разработки системы, ввода ее в эксплуатацию и на стоимость конечного

решения.

Стабильность и отказоустойчивость системы анализа связана не только с аппаратной частью ЭВМ, но и выбор операционной системы, под которой будет работать прикладное программное обеспечение. Традиционно для задач требующих высокой производительности и надежности используются семейство Unix-подобных систем. В последние несколько лет появились бесплатные аналоги коммерческих Unix систем, такие как Linux и FreeBSD системы, отличительной особенностью которых является:

- 1) работа на различных аппаратных платформах;
- 2) низкие системные требования к аппаратной части ЭВМ;
- 3) гибкость при настройке и высокая производительность;
- 4) открытые исходные тексты ОС;
- 5) наличие бесплатных компиляторов, позволяющие писать программы на различных языках программирования;
- 6) высокая защищенность и широкий набор дополнительного программного обеспечения.

База данных представляет собой программный продукт, который позволяет централизованно хранить различные типы данных. С помощью специального языка запросов база данных дает возможность осуществлять поиск, сортировку, замену и другие операции с хранящимися в ней данными. В базе данных системы обнаружения НСД может храниться информация о затухании или другая характеристика ветви ОСД, поступающая от системы диагностики состояния ВОЛС. База данных должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) стабильность работы;
- 2) производительность;
- 3) возможность создания резервных копий.

Основным компонентом системы анализа изменений характеристик ВОЛС является программа анализа данных. Перечисленные выше компоненты

являются главными, но не основными, потому как являются вспомогательными компонентами по отношению к программе анализа данных. Их основной задачей является бесперебойное предоставление данных программе анализа. С ее помощью осуществляется обработка входящего потока данных и, в случае выявления отклонения одной или нескольких исследуемых характеристик, программа выносит решение о причинах, вызвавших эти отклонения. В своей работе программа использует алгоритмы обработки данных и математические методы, позволяющие повысить эффективность работы. Для того чтобы система анализа данных выдавала правильные результаты необходимо выполнение следующих условий:

- 1) изучение всех возможных ситуаций, которые могут вызвать отклонение той или иной анализируемой характеристики;
- 2) исследование каждой ситуации в отдельности, чтобы установить уникальные свойства, характерные только для нее;
- 3) математико-алгоритмичное описание результатов, полученных в ходе исследований;
- 4) представление результатов, полученных на предыдущем шаге в программном виде.

Выводы к главе 2

Во второй главе проведено исследование возможности проведения в ОСД НСД через макроизгиб ОВ. В ходе исследования было установлено, что НСД возможен в любой ветви ОСД, что связано избыточным уровнем передаваемой мощности оптического излучения. Использование оптического рефлектометра в ОСД имеет существенные недостатки: длительное время получение рефлектограммы, в течение которого отсутствует информация о состоянии ВОЛС; отсутствие точной информации о сегменте сети, в котором появилась неоднородность, если неоднородность находится за оптическим разветвителем; возможные ошибки при установлении причины, вызвавшей неоднородность,

если неоднородность находится за оптическим разветвителем. Исследование возможности использования контрольных сигналов в ОСД для обнаружения неоднородностей показало способность быстро и точно отслеживать изменение характеристик ВОЛС, идентифицировать ветвь ОСД, в которой возникла неоднородность, повлекшая рост затухания, а также имеется возможность идентифицировать макроизгибы ОВ. Во второй главе предложена система обнаружения несанкционированных подключений к ОВ, учитывающая особенности ОСД. Основное отличие представленной системы обнаружения неоднородностей и НСД в ОСД от систем диагностики магистральных ВОЛС состоит в одновременном отслеживании характеристик двух контрольных сигналов на входе каждого ОСБ, что позволяет в реальном времени обнаруживать появление неоднородностей и макроизгибов ОВ, а использование оптического рефлектометра позволяет установить расстояние до места возникновения неоднородности. Предложенная система обнаружения поддерживает следующие топологии сетей доступа: звезда, шина, дерево. Система обнаружения НСД состоит из аппаратно-программной части, что позволяет снизить цену готового решения и сократить время технической реализации. Аппаратная часть включает в себя систему диагностики состояния ВОЛС и ЭВМ. Система диагностики состояния ВОЛС используется для получения в реальном времени информации о величине затухания двух контрольных сигналов в направлении от ОЛО до ОСБ-*i*, а также рефлектограммы ВОЛС. ЭВМ используется для двух целей: с одной стороны в ЭВМ хранится история изменения исследуемых характеристик, с другой стороны в ЭВМ работает программа анализа исследуемых характеристик с целью выявления фактов НСД.

Глава 3. Исследование и разработка методик идентификации макроизгибов и несанкционированных подключений к ОВ

3.1 Критерий идентификации макроизгибов в ОВ

В предыдущей главе была представлена система обнаружения несанкционированных подключений, позволяющая с помощью двух контрольных сигналов отслеживать изменение затухания контрольных сигналов на входе каждого ОСБ. Для установления причин изменения затухания контрольных сигналов требуется математическая обработка получаемых результатов. В первой главе было установлено, что величина прироста затухания оптических сигналов вследствие макроизгиба ОВ зависит от длины волны оптического излучения, а также от радиуса изгиба ОВ. Пусть на выходе двух источников оптического излучения с λ_1 , λ_2 , мощность оптических сигналов была $P_{\lambda_1.вых}$, $P_{\lambda_2.вых}$. А на входе двух измерителей оптической мощности соответственно $P_{\lambda_1.вх}$, $P_{\lambda_2.вх}$. Тогда затухание каждого контрольного сигнала будет определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\alpha_{\lambda_1} &= 10 \lg \frac{P_{\lambda_1.вых}}{P_{\lambda_1.вх}} \\ \alpha_{\lambda_2} &= 10 \lg \frac{P_{\lambda_2.вых}}{P_{\lambda_2.вх}}\end{aligned}\quad (3.1)$$

При появлении в ОВ неоднородности, вызванной макроизгибом ОВ с радиусом изгиба R_1 , при неизменной величине мощности сигналов на входе, принимающей стороне будет регистрироваться мощность контрольных сигналов $P'_{\lambda_1.вх}$, $P'_{\lambda_2.вх}$, и, следовательно, могут быть получены величины прироста затухания для каждого сигнала:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{\lambda_1}(R_1) &= |\alpha_{\lambda_1} - \alpha'_{\lambda_1}| \\ \Delta\alpha_{\lambda_2}(R_1) &= |\alpha_{\lambda_2} - \alpha'_{\lambda_2}|\end{aligned}\quad (3.2)$$

Величины приростов затухания контрольных сигналов будут совпадать при создании изгиба ОВ с тем же радиусом на другом участке ОВ или в том же самом участке, но спустя некоторое время. Меняя величину радиуса изгиба ОВ можно получить зависимость величины прироста затухания сигналов от величины радиуса изгиба ОВ. В том случае, когда известна зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ, можно проводить обратную операцию, когда по величине прироста затухания оптического излучения определяется величина радиуса изгиба ОВ:

$$R(\Delta\alpha_{\lambda})$$

В ВОЛС, как отмечалось ранее, возможны разные причины, вызывающие рост затухания в ОВ. Условием того, что в момент времени t увеличение затухания двух сигналов вызвано макроизгибом ОВ, будет равенство радиусов изгиба ОВ:

$$R(\Delta\alpha_{\lambda_1}) = R(\Delta\alpha_{\lambda_2}) \quad (3.3)$$

В первой главе было показано, что зависимость величины прироста затухания оптического излучения с длиной волны λ_1 от радиуса изгиба ОВ имеет сложный характер в том случае, если на цилиндре с радиусом R находится 1 виток ОВ. Одна величина прироста затухания в ОВ может соответствовать двум разным радиусам изгиба ОВ в результате чего выражение 3.2 не будет являться достаточным для принятия решения о наличии макроизгиба в ОВ. В первой главе также было отмечено, что величина прироста затухания зависит от длины волны оптического излучения и может для одних длин волн более чем в 2 раза превосходить величину прироста затухания для других длин волн. Таким образом, для двух сигналов с разными длинами волн, одновременно передаваемых по одному и тому же ОВ, подверженному макроизгибу, можно получить величину связывающую радиус изгиба ОВ с влиянием на два оптических сигнала:

$$K_{связи}(R_1) = \frac{\Delta\alpha_{\lambda 1}(R_1)}{\Delta\alpha_{\lambda 2}(R_1)} \quad (3.4)$$

Тогда необходимым и достаточным условием того, что прирост затухания двух контрольных сигналов в момент времени $t_{измер}$ является макроизгиб ОВ, будет:

$$\begin{cases} R_{изгиба}(\Delta\alpha_{\lambda 1}) = R_{изгиба}(\Delta\alpha_{\lambda 2}) = R_{изгиба}\left(\frac{\Delta\alpha_{\lambda 1}}{\Delta\alpha_{\lambda 2}}\right), & \text{макроизгиб ОВ} \\ R_{изгиба}(\Delta\alpha_{\lambda 1}) \neq R_{изгиба}(\Delta\alpha_{\lambda 2}) \neq R_{изгиба}\left(\frac{\Delta\alpha_{\lambda 1}}{\Delta\alpha_{\lambda 2}}\right), & \text{не макроизгиб ОВ} \end{cases} \quad (3.5)$$

Важным параметром измерителя оптической мощности (ИОМ) является устойчивость его работы при различных уровнях шумов. Основные источники шумов в оптических детекторах - квантовый шум, остаточный ток и поверхностный ток утечки. Квантовый шум обусловлен статистической конверсией фотонов в электроны на поверхности детектора. Остаточным током называется поток заряженных частиц при отсутствии светового сигнала. Ток утечки зависит от наличия дефектов на поверхности детектора, чистоты поверхности и напряжения смещения. У детекторов на основе сплава InGaAs остаточный ток намного меньше, чем у детекторов на основе Ge. Дополнительным фактором увеличения уровня шумов является температура (температурный шум). Остаточный ток детекторов на основе Ge значительно зависит от температуры, в то время как для детекторов InGaAs он практически не зависит от нее. Таким образом, ИОМ на основе детекторов InGaAs могут устойчиво работать в широком диапазоне температур без необходимости дополнительной стабилизации. В то же время детекторы на основе InGaAs являются довольно дорогими, что обеспечило высокое распространение ИОМ на основе Ge при прокладке и эксплуатации оптических кабелей в полевых условиях, поскольку такие ИОМ имеют эффективное соотношение цена/качество. ИОМ на основе InGaAs используются в основном в

лабораториях для проведения измерений с высокой точностью, но могут успешно использоваться и при эксплуатации.

Для уменьшения влияния случайных погрешностей на результаты измерений необходимо проводить серию измерений при одних и тех же условиях. Тогда за оценку истинного значения измеряемой величины принимается выборочное среднее значение:

$$\hat{P}_{\text{вх.изм}}(\lambda_1) = \bar{P}_{\text{вх.изм}}(\lambda_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{вх.изм}_i}(\lambda_1) \quad (3.6)$$

В качестве оценки случайной погрешности среднего значения $\bar{P}(\lambda_1)$ принимается выборочное стандартное отклонение среднего арифметического (среднеквадратичная погрешность среднего арифметического), которая стремится к нулю по мере увеличения количества измерений:

$$S_{\bar{P}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n [P_{\text{вх.изм}_i}(\lambda_1) - \bar{P}_{\text{вх.изм}}(\lambda_1)]^2} \quad (3.7)$$

Очевидно, что чем больше время, в течение которого проводятся измерения, тем больше вероятность того, что измерения будут проводиться не в одинаковых условиях. В идеале $T_{\text{изм}} \rightarrow dt$, $N_{\text{изм}} \rightarrow \infty$. На практике для получения величины прироста затухания в ВОЛС вместо выражения 3.1 удобнее использовать следующую последовательность действий. На стороне каждого ОСБ через заданные интервалы времени осуществляется измерение мощности каждого контрольного сигнала за малый интервал времени, см. формулу 3.5. В случае отсутствия внешних воздействий на ОВ средняя величина мощности контрольных сигналов будет оставаться постоянной и может считаться истинным значением затухания сигнала в данном направлении. Изменяться может только величина случайной погрешности среднего значения. Появление в ОВ неоднородности приведет к тому, что на

входе ОСБ будет регистрироваться величины $P'_{\lambda 1. \text{BX}}$, $P'_{\lambda 2. \text{BX}}$ [дБм]. Тогда среднее значение величины прироста затухания будет определяться выражением 3.8:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\alpha}_{\lambda 1}(R_1) &= \left| \bar{P}_{\text{вх.изм}}_{\lambda 1} - \bar{P}'_{\text{вх.изм}}_{\lambda 1} \right| \\ \Delta \bar{\alpha}_{\lambda 2}(R_1) &= \left| \bar{P}_{\text{вх.изм}}_{\lambda 2} - \bar{P}'_{\text{вх.изм}}_{\lambda 2} \right| \end{aligned} \quad (3.8)$$

Увеличение затухания одного или двух контрольных сигналов на входе ОСБ, рассчитанное по формуле (3.8), может произойти по причине изменения уровня выходной мощности передатчиков контрольных сигналов. Для повышения точности определения затухания в ветви ОСД на стороне ОЛО устанавливают дополнительные измерители мощности контрольных сигналов так, чтобы минимизировать внешнее воздействие на точность получаемых результатов. Тогда затухание в i -й ветви будет определяться:

$$\begin{aligned} \alpha_{\lambda 1} &= P_{\text{вх.}\lambda 1. \text{ОЛО}} + \alpha_{\text{конт.}\lambda 1} - P_{\lambda 1. \text{вх}} \\ \alpha_{\lambda 2} &= P_{\text{вх.}\lambda 2. \text{ОЛО}} + \alpha_{\text{конт.}\lambda 2} - P_{\lambda 2. \text{вх}} \end{aligned}, \quad (3.9)$$

где $P_{\text{вх.}\lambda 1. \text{ОЛО}}$ - уровень мощности контрольного сигнала λ_1 на входе измерителя на стороне ОЛО, [дБм]; $\alpha_{\text{конт.}\lambda 1}$ - суммарное затухание между источником контрольного сигнала λ_1 и измерителем контрольного сигнала на стороне ОЛО, [дБ]; $P_{\lambda 1. \text{вх}}$ - уровень мощности контрольного сигнала λ_1 на входе ОСБ, [дБм].

3.2 Исследование и разработка алгоритмов идентификации несанкционированных подключений к ОВ

Как отмечалось в предыдущих главах, первая задача, стоящая перед злоумышленником, заключается в получении доступа к оптическому волокну. Перечислим все участки ВОЛС, где может быть получен несанкционированный доступ к оптическому волокну:

1) оптические муфты, в которых производится соединение строительных длин и имеется запас оптического волокна;

2) оптические разветвители, с помощью которых организуются новые оптические маршруты;

3) оптический кабель.

После получения злоумышленником доступа к оптическим волокнам, перед ним возникает задача идентификации активного волокна или волокон. Для этого могут быть использованы различные уже имеющиеся технические средства. Некоторые устройства создают макроизгиб ОВ для получения локальной неоднородности, которая позволяет отвести часть передаваемой оптической мощности и тем самым определить наличие или отсутствие оптических сигналов. По причине того, что в оптическом кабеле количество ОВ как правило больше одного, злоумышленником могут быть предприняты следующие действия

1) злоумышленник подключает устройство проверки наличия оптических сигналов к каждому из ОВ с последующим отключением;

2) злоумышленник производит последовательное подключение нескольких устройств проверки наличия оптических сигналов к каждому из ОВ, после подключения устройство идентификации активных волокон не отключается;

3) злоумышленник производит подключение к каждому из ОВ устройства НСД с радиусом изгиба, вызывающим минимальный прирост затухания. При наличии оптических сигналов устройство не отключается, проверка других волокон производится аналогичным способом с помощью другого устройства.

4) злоумышленник заранее знает ОВ, по которым осуществляется передача или использует другие средства идентификации активных волокон, которые не вызывают изменений характеристик передаваемых сигналов.

После проведения одного из описанных выше действий злоумышленника появляется информация об ОВ, с которых в дальнейшем будет осуществляться

несанкционированный съем данных.

Следующим этапом в действиях злоумышленника будет подключение к ОВ с передаваемыми информационными сигналами устройства НСД. Здесь могут быть следующие варианты:

- 1) К оптическому волокну с передаваемыми оптическими сигналами производится подключения устройства НСД с фиксированным радиусом изгиба, который не может быть изменен во времени;
- 2) К оптическому волокну с передаваемыми оптическими сигналами производится подключения устройства НСД с динамично изменяемой величиной угла изгиба ОВ.

Подключение устройства с фиксированным радиусом изгиба подразумевает, что, начиная с некоторого момента времени, в ОВ наблюдается постоянный во времени прирост затухания, как для информационных, так и для контрольных сигналов. В том случае, если к ОВ произведено подключения устройства НСД с возможностью динамического изменения величины радиуса изгиба ОВ, то, начиная с некоторого момента времени, может наблюдаться рост затухания, постоянная во времени величина затухания, уменьшение с течением времени величины прироста затухания.

Рассмотрим следующий случай: пусть имеется ОСД, в которой для передачи прямого и обратного информационного потока используется одно оптическое волокно. Пусть в ОСД развернута система обнаружения НСД, аналогичная той, что представлена на рисунке 2.9 в которой задействована методика и критерий идентификации макроизгибов ОВ.

На рисунке 3.1 показаны 4 основных возможных случая, описывающих процесс идентификации ОВ, по которому осуществляется передача информационных сигналов. Область «А» соответствует интервалу времени, в течение которого с ОВ не проводилось каких-либо действий. Область «Б» обозначает интервал времени, когда к ОВ осуществляется подключение устройства идентификации активного ОВ. Область «С» соответствует

интервалу времени, когда завершается этап идентификации ОВ и дальше с ОВ не проводятся каких-либо действий. Рисунки 3.1а и 3.1б соответствуют случаям, когда к ОВ осуществляется кратковременное подключение разного класса устройств, позволяющих идентифицировать активное ОВ.

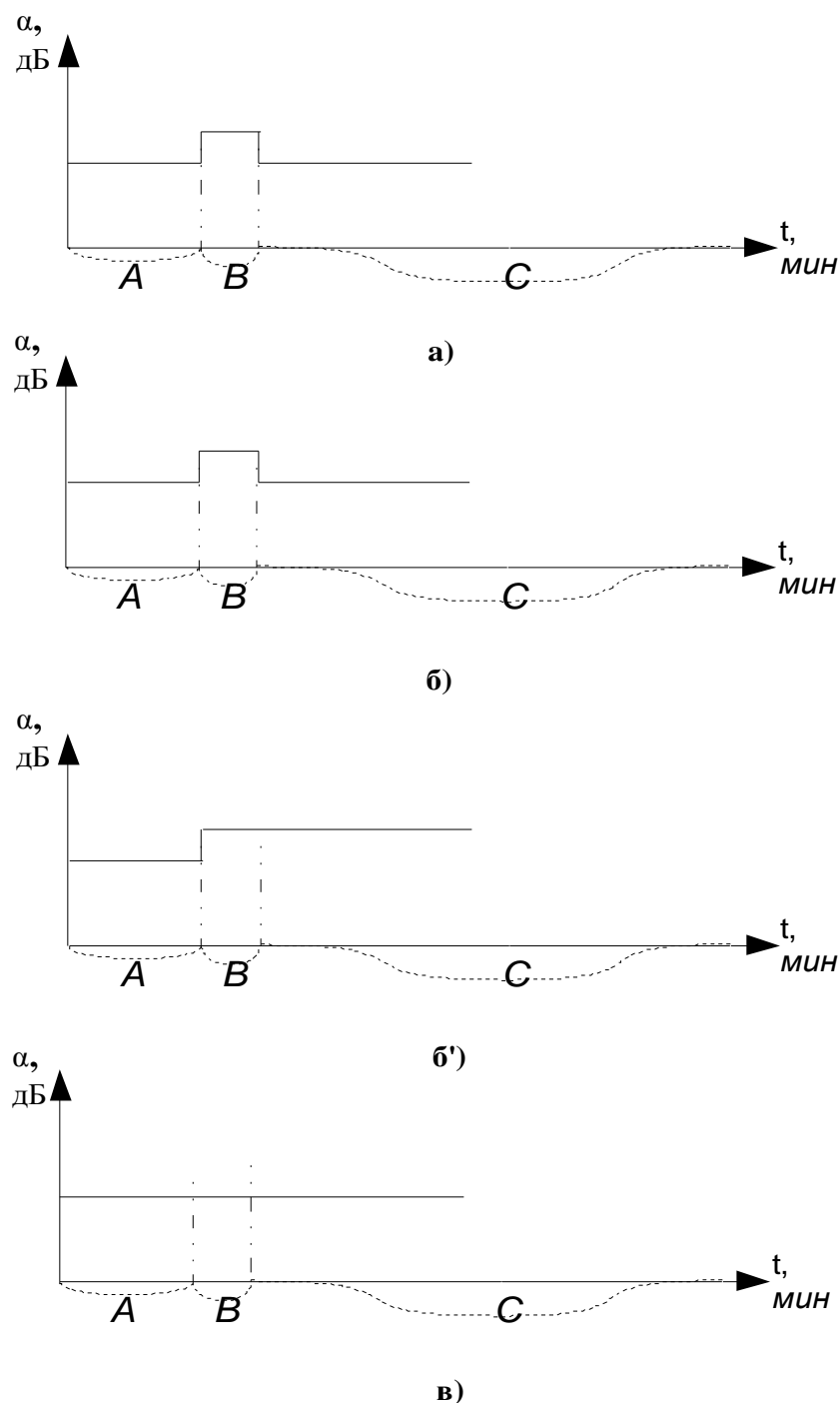
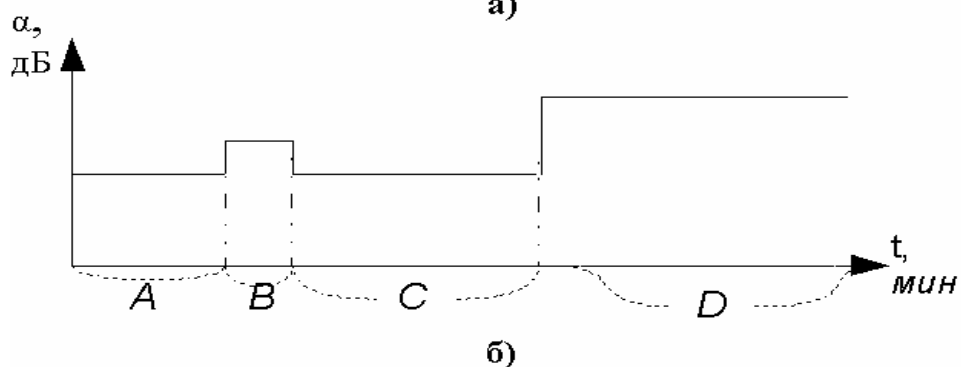
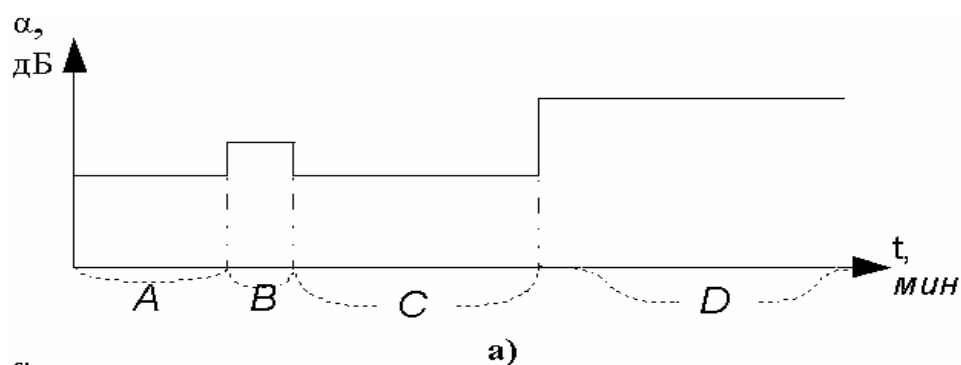


Рис.3.1 Регистрация системой обнаружения действий по идентификации активного волокна

На рисунке 3.1а представлен случай, когда к ОВ производится подключение отдельного устройства идентификации активного волокна. На рисунках 3.1б и 3.1б' представлены возможные варианты подключения универсального устройства, позволяющего с минимальным радиусом изгиба идентифицировать активное ОВ и с большим радиусом изгиба получать необходимую мощность для обработки информационных сигналов. На рисунке 3.1б' показан случай, когда устройство идентификации активного ОВ продолжает вносить минимальную величину затухания. Данный случай стоит учитывать по той причине, что такое изменение во времени величины затухания близко к тому, что может возникнуть в ОВ по причине внешнего воздействия.

На рисунке 3.2 представлены возможные случаи, когда к активному ОВ производится подключение устройства НСД. Как следует из рисунка 3.2, с определенного момента времени возникает ситуация, когда системой обнаружения регистрируется большая величина затухания по сравнению с тем, что могло иметь место в прошлом. Эта ситуация соответствует области «D».



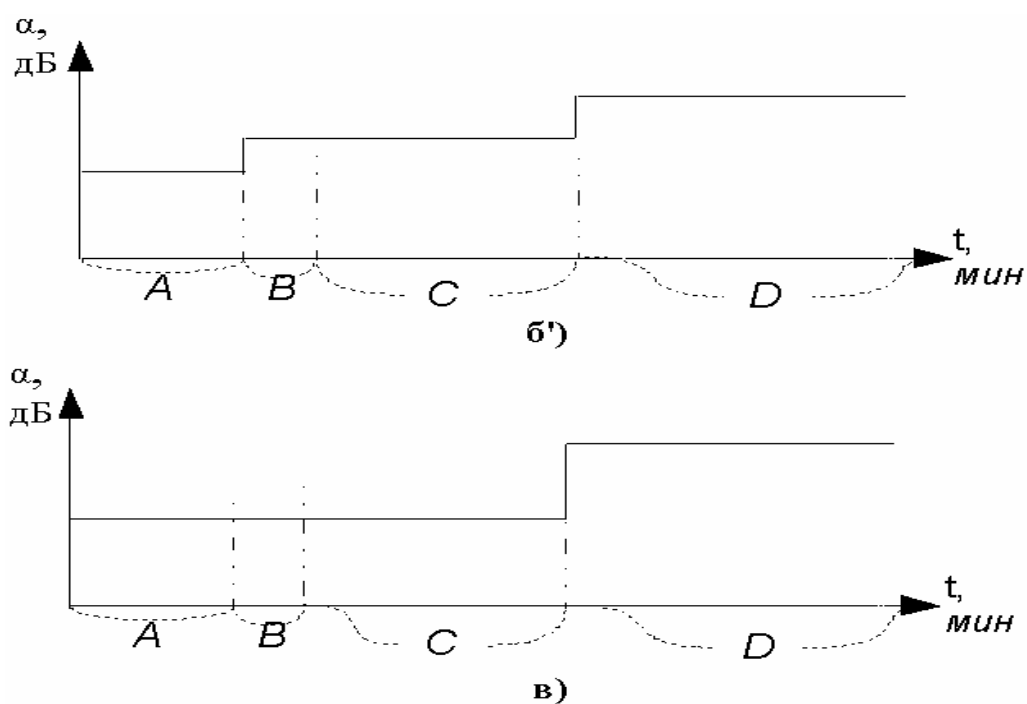
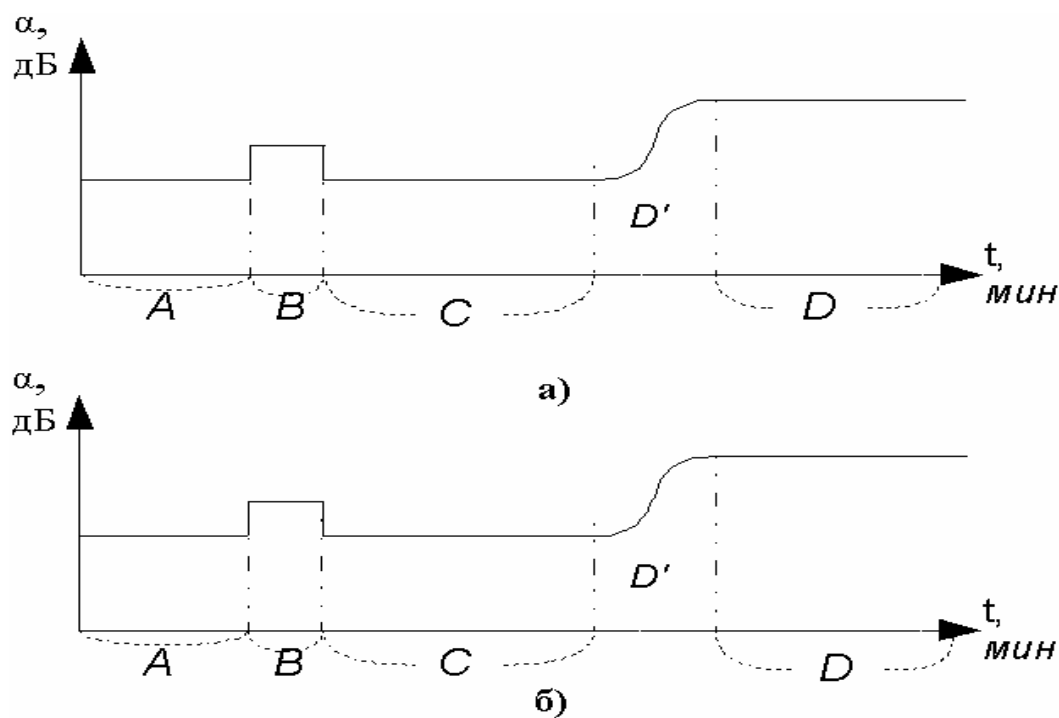


Рис.3.2 Регистрация системой обнаружения подключения устройства НСД с постоянной величиной радиуса изгиба ОВ

На рисунке 3.3 представлена ситуация, когда к ОВ производится подключение устройства НСД с динамично увеличивающейся величиной радиуса изгиб ОВ.



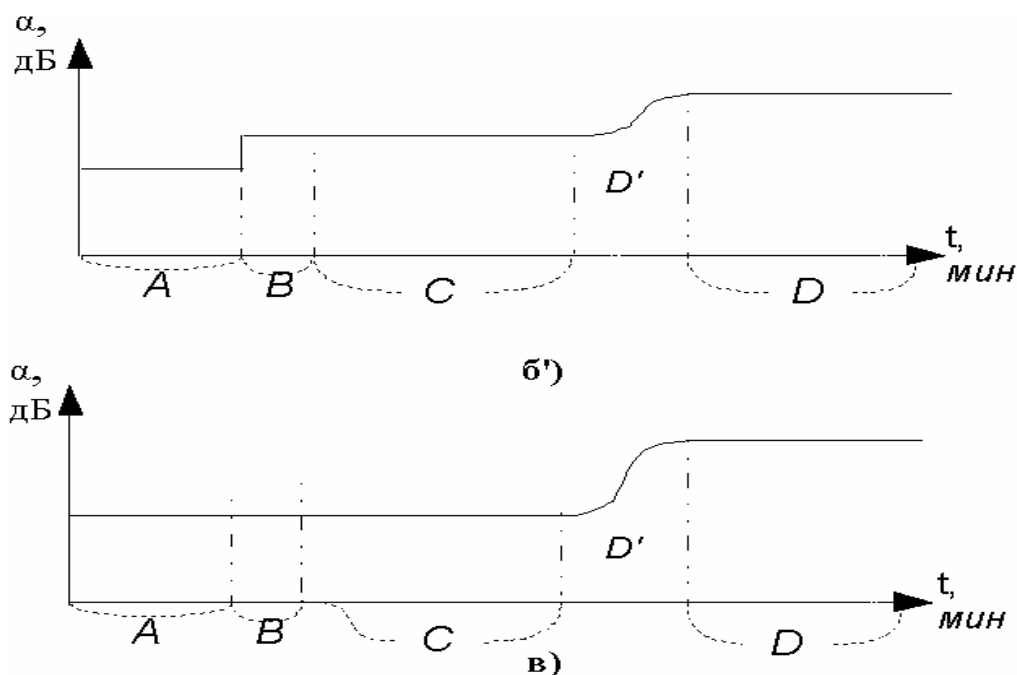


Рис.3.3 Регистрация системой обнаружения подключения устройства НСД с динамично увеличивающимся радиусом изгиба ОВ.

Как и в случае рисунка 3.2, на рисунке 3.3 имеется область «D», которой в отличие от рисунка 3.2 предшествует область «D'». В интервале времени, соответствующему области «D'», происходит изменение характеристик устройства НСД с целью получения требуемых характеристик ответвляемого информационного сигнала. Как отмечалось ранее, одним из элементов системы обнаружения несанкционированных подключений является база данных, в которую заносится информация о величине прироста затухания через заданные интервалы времени. Таким образом, в базе данных хранится таблично заданная функция, описывающая процесс прироста затухания в ОВ с течением времени.

Процесс идентификации несанкционированного подключения состоит из следующих этапов, см. рис. 3.4. На первом этапе в реальном времени обрабатываются уровни мощности контрольных сигналов, поступающие от ОСБ. Вновь поступающие измерения проверяются на их соответствие ожидаемым значениям. В том случае, если результаты измерений совпадают с ожидаемыми значениями, осуществляется обработка следующей пары значений. В том случае, если обрабатываемые результаты измерения

отличаются от ожидаемых значений, то для каждого контрольного сигнала вычисляется прирост затухания. На следующем этапе производится обработка величин прироста затухания с помощью критерия идентификации макроизгиба ОВ. В том случае, если прирост затухания вызван макроизгибом, соответствующая строка БД помечается специальным флагом (меткой), по которому эту строку можно выделить из всех имеющихся в БД строк. На этом работа алгоритма завершается и происходит обработка следующей строки.

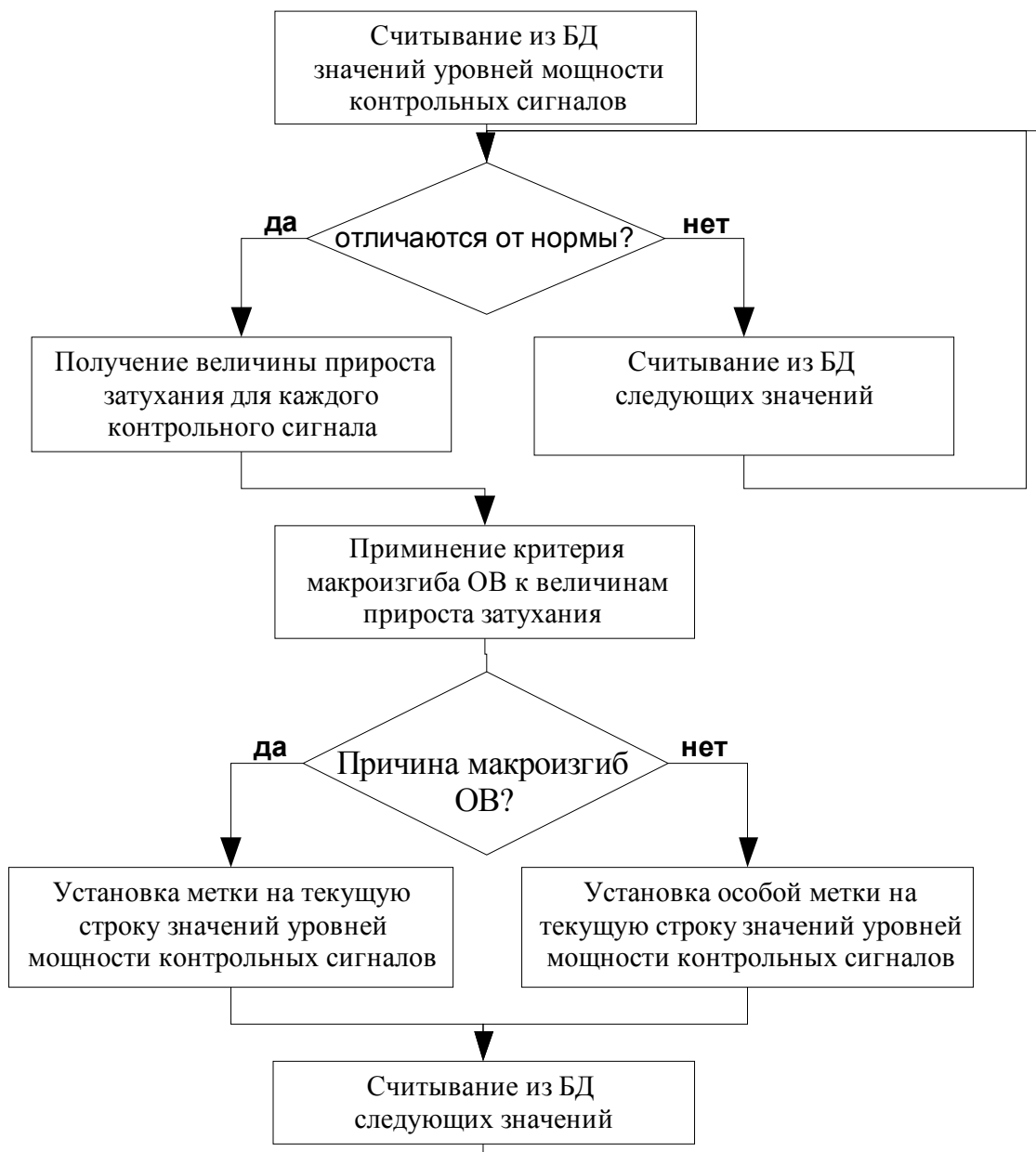


Рис.3.4 Алгоритм обработки уровней мощности контрольных сигналов

Ниже приведены возможные варианты меток (флагов), присваиваемых той или

иной строке:

00 - затухание контрольных сигналов соответствует норме

10 - по сравнению с предыдущей парой значений контрольных сигналов отмечается начало прироста затухания контрольных сигналов, вызванное макроизгибом

11 - при сравнении с предыдущей парой значений контрольных сигналов наблюдается неизменная величина прироста затухания контрольных сигналов, вызванная макроизгибом ОВ

12 – по сравнению с предыдущей парой значений наблюдается рост величины прироста затухания контрольных сигналов, вызванный макроизгибом ОВ

13 – по сравнению с предыдущей парой значений контрольных сигналов наблюдается уменьшение величины прироста затухания контрольных сигналов, причиной оставшегося прироста затухания является макроизгиб

33 – наблюдается прирост затухания у одного или двух контрольных сигналов, причиной является не макроизгиб ОВ.

Необходимость меток обусловлена следующими причинами. На рисунках 3.2 и 3.3 представленные графические иллюстрации возможных действий, необходимых для НСД. Представленные на рисунках 3.2 и 3.3 результаты являются шаблонами, с которыми можно сравнивать таблично заданную зависимость изменения затухания в ветви ОСД с течением времени. Так как длительность каждого этапа, требуемого для НСД, может отличаться по продолжительности, метки решают задачу приведения таблично заданной функции к стандартному виду, пригодному для сравнения.

На рисунке 3.5 приведен алгоритм, позволяющий на основании данных о макроизгибах, хранящихся в БД, выносить решение о НСД с ОВ.

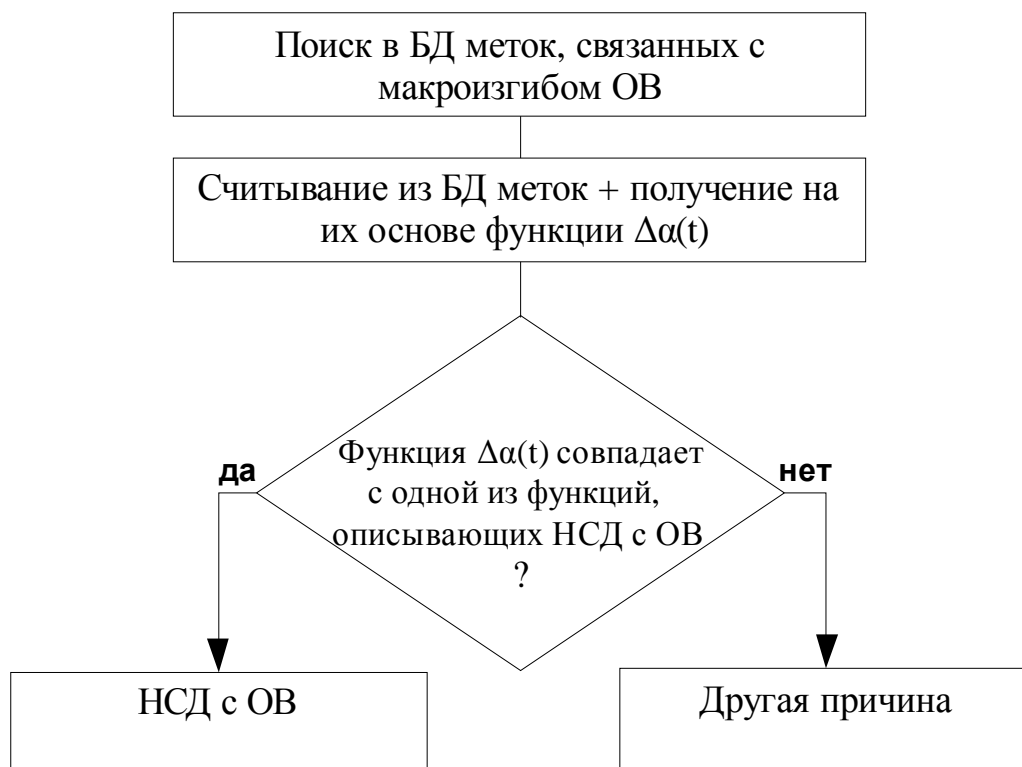


Рис.3.5 Алгоритм идентификации НСД с ОВ

На первом шаге в БД осуществляется поиск строки, свидетельствующей о том, что с некоторого момента времени в ОВ появилась неоднородность, вызванная макроизгибом ОВ. На рисунке 3.4 показано, что такие строки отмечаются особым флагом (меткой). Это необходимо для ускорения обработки данных БД и быстрого определения момента времени, с которого в ветви ОСД наблюдается макроизгиб ОВ. Начиная со строки, отмеченной флагом «10» и далее, производится считывание последующих строк вплоть до последней строки БД. На основании полученных данных строится функция, описывающая изменение прироста затухания в ОВ с течением времени. На следующем этапе проводится сравнение полученной на предыдущем шаге функции с функциями, описывающими изменение величины прироста затухания, вызванной макроизгибом ОВ с течением времени, характерными для НСД. В случае совпадения полученной функций с одной функций, описывающих изменение затухания в ОВ вследствие НСД, выносится решение о факте НСД с ОВ.

Опыт эксплуатации ВОЛС показал, что основной вклад в увеличение затухания в ОВ вносят микротрещины и другие факторы, из-за которых с течением времени и возникает дополнительный прирост затухания [44-47].

Следует отметить, что вносимое микротрещинами затухание примерно одинаково для оптических излучений с разной длиной волны, что явно отличается от характера затухания, вызванного макроизгибом ОВ. Необходимо учитывать и тот факт, что с течением времени происходит постепенное старение всех оптических компонентов, что с большей или меньшей степенью влияет на рост затухания. Очевидно, что процесс старения необратимый, это в свою очередь отражается на характере затухания в ОВ, который с течением времени должен увеличиваться, но не уменьшаться. На рисунках 3.2, 3.3 ситуация с изменением затухания выглядит иначе. В некоторых случаях, показанных на рисунке 3.2а, 3.2б, 3.3а, 3.3б, может наблюдаться рост затухания в ОВ с последующим уменьшением, что противоречит процессу естественного изменения затухания с течением времени. На рисунках 3.2б', 3.3б', 3.3в наблюдается иная картина. С течением времени наблюдается рост затухания, вызванный макроизгибом. Общая тенденция увеличения затухания не противоречит процессу изменения затухания с течением времени. О неестественном характере прироста затухания свидетельствует время, в течение которого происходит рост затухания: за короткий интервал времени наблюдается значительный рост затухания, а также тот факт, что причиной затухания является макроизгиб ОВ, а не микротрещины, которые являются основной причиной роста затухания в ОВ. Другой отличительной особенностью НСД может быть область роста затухания до некоторого постоянного значения, которая на рисунке 3.3 показана «D'». В области «D'» наблюдается значительный прирост затухания, вызванный макроизгибом, за короткий интервал времени, что не типично для ВОЛС.

Алгоритм обнаружения несанкционированного подключения к ВОЛС посредством макроизгиба ОВ, представленный на рисунках 3.4, 3.5 обладает

рядом недостатков. В том случае, если заранее известно ОВ, по которому осуществляется передача информационных сигналов, НСД может быть проведен так, как показано на рисунке 3.3в. В данном случае НСД;))) ничем не отличается от ситуации, когда в силу той или иной причины в ВОЛС наблюдается рост затухания в ОВ, вызванный макроизгибом ОВ. В некоторый момент времени наблюдается мгновенное увеличение величины затухания ОВ, которое не меняется с течением времени. За исключением того факта, что причиной прироста является макроизгиб ОВ, ситуация, представленная на рисунке 3.3в, мало чем отличается от естественного процесса роста затухания в ОВ, следовательно, существуют проблема в принятии правильного решения о вызвавших ее причинах.

Следующим недостатком является тот факт, что СОНП фиксирует события, происходящие в ОСД, не отвечая на них каким-либо действием, которое бы позволило вынести более точное решение о вызвавших его причинах. Недостаток оптических сетей доступа, у которых отсутствует резервный маршрут передачи информационных сигналов, связан с тем, что при регистрации СОНП НСД с ОВ злоумышленник будет продолжать иметь доступ ко всем передаваемым сигналам, для предотвращения этого потребуется прекратить передачу всех информационных сигналов.

Рассмотрим случай, когда система обнаружения несанкционированных подключений параллельно осуществляет мониторинг двух ОВ, что показано на рисунке 3.6.

В случае, представленном на рисунке 3.6, информационные сигналы передаются по одному ОВ. Два контрольных оптических сигнала, с помощью которых осуществляется мониторинг ВОЛС, одновременно передаются по двум оптическим волокнам, по одному из которых также передаются информационные сигналы. Такая организация системы мониторинга близка к тому, что можно встретить в существующих ВОЛС, когда по выделенному

оптическому волокну в реальном времени осуществляется мониторинг характеристик волоконно-оптического тракта.

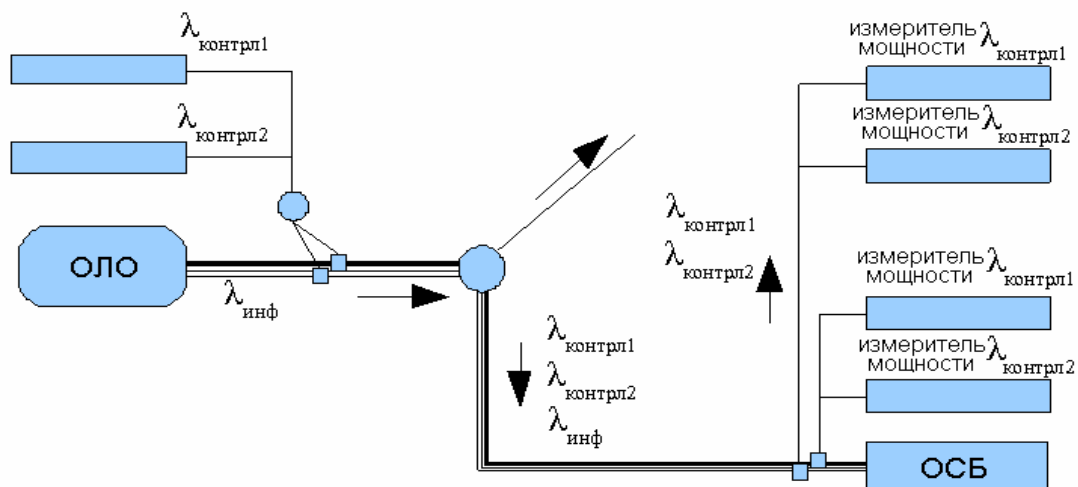


Рис.3.7 Система обнаружения несанкционированных подключений, работающая по двум ОВ

На приемной стороне установлены 2 пары измерителей оптической мощности, каждый из которых настроен на длину волны соответствующего контрольного сигнала. Принцип действия системы обнаружения, представленный на рисунке 3.6, полностью аналогичен работе системы обнаружения по одному оптическому волокну. Основное отличие заключается в том, что в БД одновременно заполняются 2 таблицы, в которые заносится информация о величине затухания контрольных сигналов двух оптических волокон, и эти таблицы параллельно обрабатываются программой идентификации несанкционированных подключений. Мониторинг двух и более оптических волокон позволяет получить более полную картину происходящего в ВОЛС. Это связано с тем, что какое-либо воздействие на оптический кабель или другие компоненты ВОЛС, как правило, приведет к изменению характеристик во всех оптических волокнах приблизительно в одно и тоже время. В случае мониторинга двух оптических волокон такое воздействие будет обнаружено в самое короткое время. Другим преимуществом одновременного мониторинга двух оптических волокон является увеличение вероятности

принятия верного решения о причинах, вызвавших то или иное изменение характеристик передаваемых сигналов. В том случае, если мониторинг ВОЛС осуществляется по одному ОВ, правильная идентификация причины, вызвавшей то или иное изменение характеристик передаваемых сигналов, потребует большего времени.

Обработка результатов измерений двух контрольных сигналов в случае мониторинга двух оптических волокон мало отличается от случая, когда осуществляется мониторинг одного оптического волокна. Основное отличие заключается в том, что на каждом шаге проводится обработка двух пар данных контрольных сигналов.

Как и в случае, когда мониторинг ВОЛС осуществляется по одному оптическому волокну, в случае одновременного мониторинга двух оптических волокон программа обнаружения несанкционированных подключений использует критерий, на основании которого выносится решение о причинах, вызвавших рост затухания в ОВ.

Для того чтобы точно идентифицировать несанкционированное подключение к ОВ и выявить его отличительные признаки, требуется провести анализ причин, вызывающих рост затухания оптических излучений в пассивных ОСД. В ОСД возможны две основные «естественные» причины, приводящие к появлению макроизгибов ОВ: неумышленные действия обслуживающего персонала или замерзающая в оптических муфтах вода, которая является причиной локального макроизгиба.

Рассмотрим случай, когда причиной макроизгиба ОВ является человеческий фактор. В данном случае может иметь место как увеличение затухания, вызванное изменением радиуса изгиба ОВ, так и уменьшение затухания до меньшей величины или до нормального значения. Как правило, рост затухания в ОВ возникает при манипуляции с ОВ внутри распределительных шкафов, слишком сильной затяжке запасов соединительных шнуров или несоблюдении радиусов изгиба ОВ [48].

В том случае, когда причиной роста затухания является манипуляция с оптическим кабелем, приблизительно одинаковый рост затухания будет наблюдаться во всех оптических волокнах. Такое поведение затухания связано с конструкцией оптических кабелей и расположением в них оптических волокон. На рисунке 3.8 приведена графическая иллюстрация изменения затухания в случае манипуляции с оптическим кабелем.

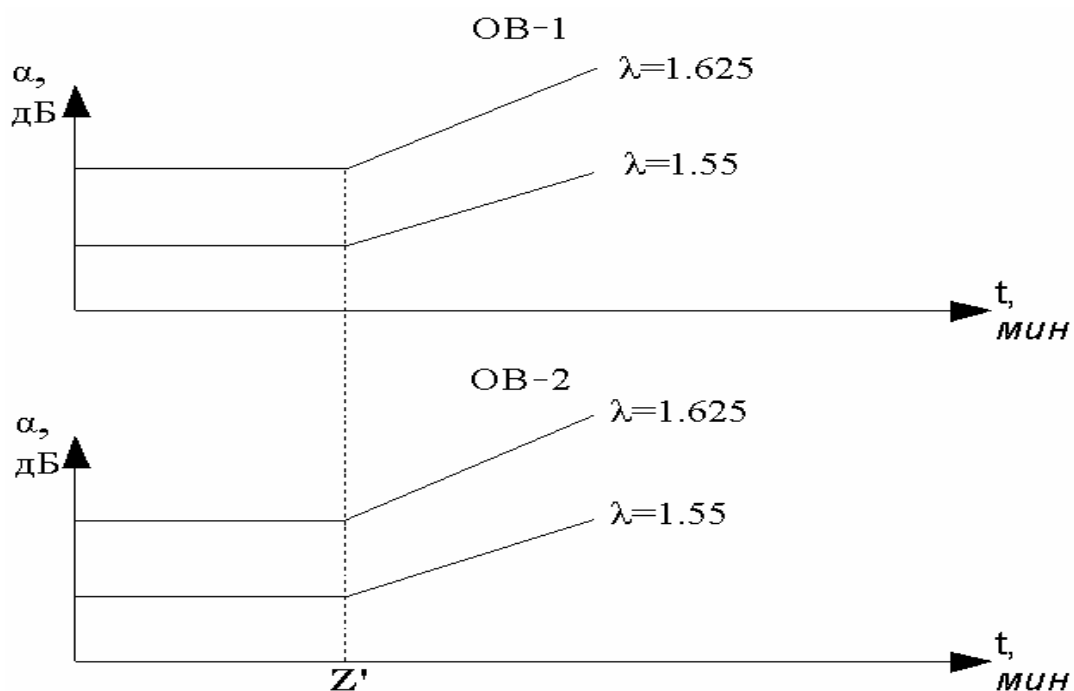


Рис.3.8 Затухание в ОВ в случае манипуляции с ОК

На рисунке 3.8 показан самый общий случай роста затухания в оптических волокнах, по которым осуществляется передача контрольных сигналов. В некоторый момент времени, который на рисунке 3.8 показан « Z' » появляется внешнее воздействие на оптический кабель, вызывающее макроиогб ОВ, что приводит к росту затухания контрольных сигналов. В том случае, если воздействие на кабель будет меняться, это отразится на графиках изменения затухания с течением времени как для первого, так и для второго оптического ОВ. Решение о том, что является причиной роста затухания в оптических волокнах: несанкционированное подключение или неаккуратные

действия обслуживающего персонала, может быть получено с помощью административных средств. Очевидно, что те или иные действия, проводимые на сети, предварительно согласуются, утверждаются и устанавливается время проведения тех или иных работ. В том случае, если регламентные работы не были запланированы, а система обнаружения регистрирует изменение характеристик контрольных сигналов, вызванные внешним воздействием на оптический кабель, будет вынесено решение о НСД к ОВ.

Рассмотрим второй случай, при котором в пассивной ОСД рост затухания возникает по причине слишком сильной затяжки запасов ОВ. В этом случае будет наблюдаться практически моментальное увеличение величины затухания. Такое поведение связано со спецификой проводимой операции. Здесь возможны два случая. В случае, показанном на рисунке 3.9а, предполагается, что два оптических волокна, по которым осуществляется передача контрольных сигналов, находятся в одном пучке, который подвержен сильной затяжке. В результате наблюдается одновременное резкое увеличение затухания контрольных сигналов сразу в двух ОВ. В случае, изображенном на рисунке 3.9б, сильной затяжке подвержено только одно ОВ. Это приведет к тому, что в одном из двух оптических волокон будет наблюдаться рост затухания контрольных сигналов, тогда как во втором затухание контрольных сигналов будет в норме. Решения о том, что является причиной роста затухания в оптических волокнах: НСД с ОВ или неаккуратные действия обслуживающего персонала может быть получено с помощью административных средств. Как было отмечено выше, те или иные действия, проводимые на сети, предварительно согласуются, утверждаются, и устанавливается время проведения тех или иных работ. В том случае, если появление макроизгиба происходит в то время, когда в ОСД не проводилось каких-либо работ, это с высокой степенью вероятности может свидетельствовать о наличии несанкционированного подключения.

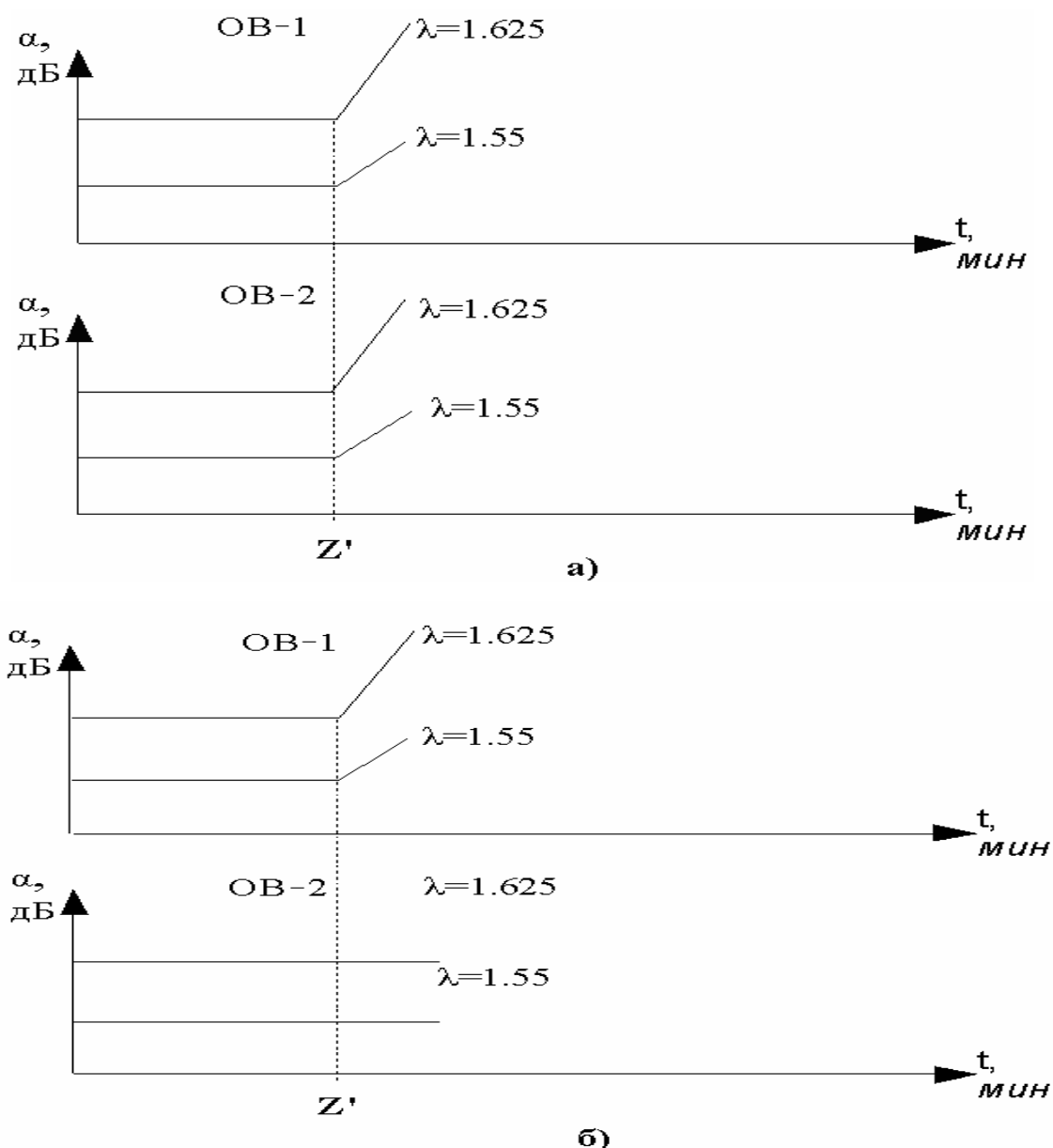


Рис.3.9 Рост затухания оптического излучения в случае сильной затяжки ОВ

Рассмотрим случай, когда причиной появления макроизгиба является несоблюдение обслуживающим персоналом допустимых радиусов изгиба ОВ. Данная ситуация может возникнуть при проведении работ с ОВ в распределительных шкафах, оптических муфтах и т.д. В этом случае характер изменения затухания будет произвольным и может быть представлен любой последовательностью интервалов роста и спада. Это будет справедливо для всех оптических волокон, по которым осуществляется передача контрольных сигналов. Например, может быть ситуация, когда макроизгиб появляется в ОВ, по которому осуществляется передача информационных сигналов, а во втором

ОВ роста затухания не наблюдается. С течением времени во втором ОВ, по которому также ведется передача контрольных сигналов, может появиться прирост затухания за счет макроизгиба с той же или другой величиной радиуса изгиба. Осложняет ситуацию тот факт, что изменение затухания в обоих оптических волокнах с течением времени может меняться совершенно произвольным образом. Единственным способом определить, что причиной такого поведения является действия обслуживающего персонала, а не НСД, является применение административных мер, о которых было сказано выше.

Под административными мерами подразумевается следующее: любая информация, связанная с проведением тех или иных работ в ОСД особым образом предоставляется программе анализа данных. Информация включает в себя 3 основные величины:

1. Номер участка, на котором планируется проведение работ;
2. Время начала проведения работ;
3. Время окончания проведения работ.

Информация о номере участка, времени начала и окончания работ заносится в специальную таблицу, хранящуюся в БД. Информация, хранящаяся в этой таблице, доступна подсистеме изменения характеристик ВОЛС, что позволяет с большей достоверностью установить факты НСД.

Алгоритм, представленный на рисунке 3.10, работает следующий образом. В двух таблицах, в которых хранится информация об уровнях мощности контрольных сигналов на входе ОСБ для 1-го и 2-го ОВ, осуществляется поиск значений, свидетельствующих о наличии в i -й ветви дополнительного затухания, вызванного макроизгибом ОВ. Время измерения проверяется на принадлежность временному интервалу, на котором в ОСД в i -й ветви обслуживающим персоналом проводились работы. В том случае, если время измерения попадает в интервал времени проведения работ на соответствующем участке, выносится решение о том, что причина связана с действиями обслуживающего персонала. В противном случае выносится

решение о НСД.

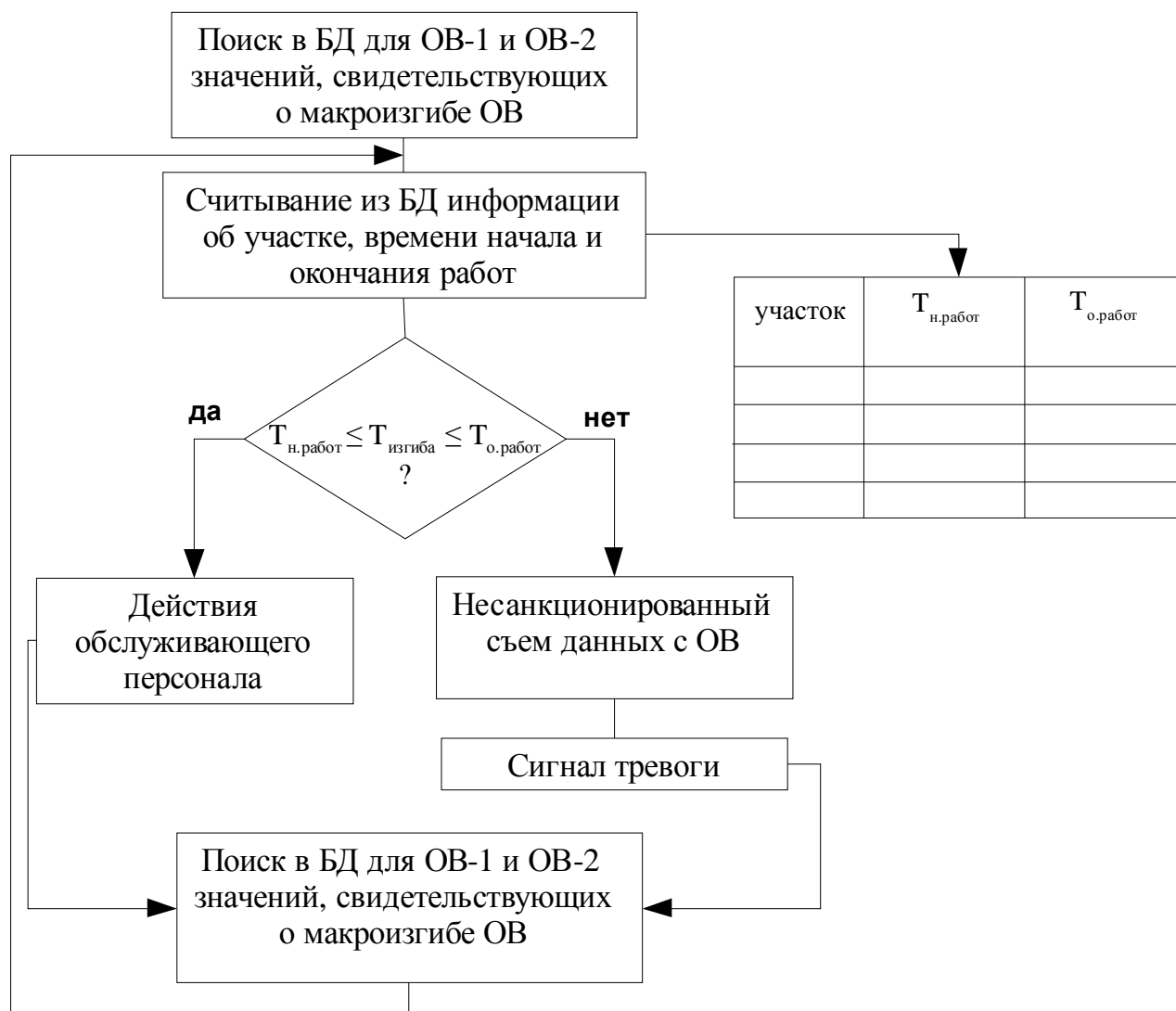


Рис.3.10 Алгоритм идентификации макроизгибов, возникших из-за действий обслуживающего персонала

Как было отмечено выше, рост затухания в ОВ может наблюдаться по причине замерзающей воды, в результате которой возможно появления макроизгибов ОВ. [48,49]. В этом случае будет наблюдаться следующая картина. В том случае, если воздействию замерзающей воды подвержено только одно оптическое волокно, будет наблюдаться плавный рост затухания в ОВ, увеличивающийся по мере замерзания воды. Процесс плавного роста затухания завершается стабилизацией величины прироста затухания, которая должна оставаться постоянной до момента оттаивания. В том случае, если

каждое ОВ подвержено воздействию замерзающей воды, то картина будет несколько отличаться от той, что была представлена выше. В этом случае для обоих оптических волокон будет наблюдаться плавный рост затухания, величина которого для обоих волокон не обязательно будет одинаковой. Это связано с тем, что площадь ОВ, подверженного воздействию замерзающей воды может отличаться, что приведет к разным величинам радиуса изгиба и как следствие к разным величинам прироста затухания в ОВ. С другой стороны возможен случай, когда замерзающая в муфте вода может создавать макроизгиб только в одном оптическом волокне, а спустя некоторое время будет наблюдаться макроизгиб других ОВ. Действия замерзающей в оптической муфте воды по своему характеру и развитию могут напоминать как халатные действия обслуживающего персонала, так и НСД. Снизить вероятность ложного срабатывания системы обнаружения можно с помощью алгоритма, представленного на рисунке 3.11.

Алгоритм, изображенный на рисунке 3.12 работает следующий образом. В двух таблицах, в которых находится информация о величинах затухания контрольных сигналов, осуществляется поиск значений, свидетельствующих о наличии в i -м направлении источника дополнительного затухания за счет макроизгиба ОВ. Время проведенного замера проверяется на принадлежность временному интервалу, в который может возникнуть рост затухания в ОВ по причине замерзания воды в оптической муфте. Как показано на рисунке, в таблице могут быть как минимум три временных интервала, в один из которых должны попасть данные контрольных замеров для того, чтобы было вынесено решение о наличии макроизгиба вследствие замерзания воды в оптической муфте.

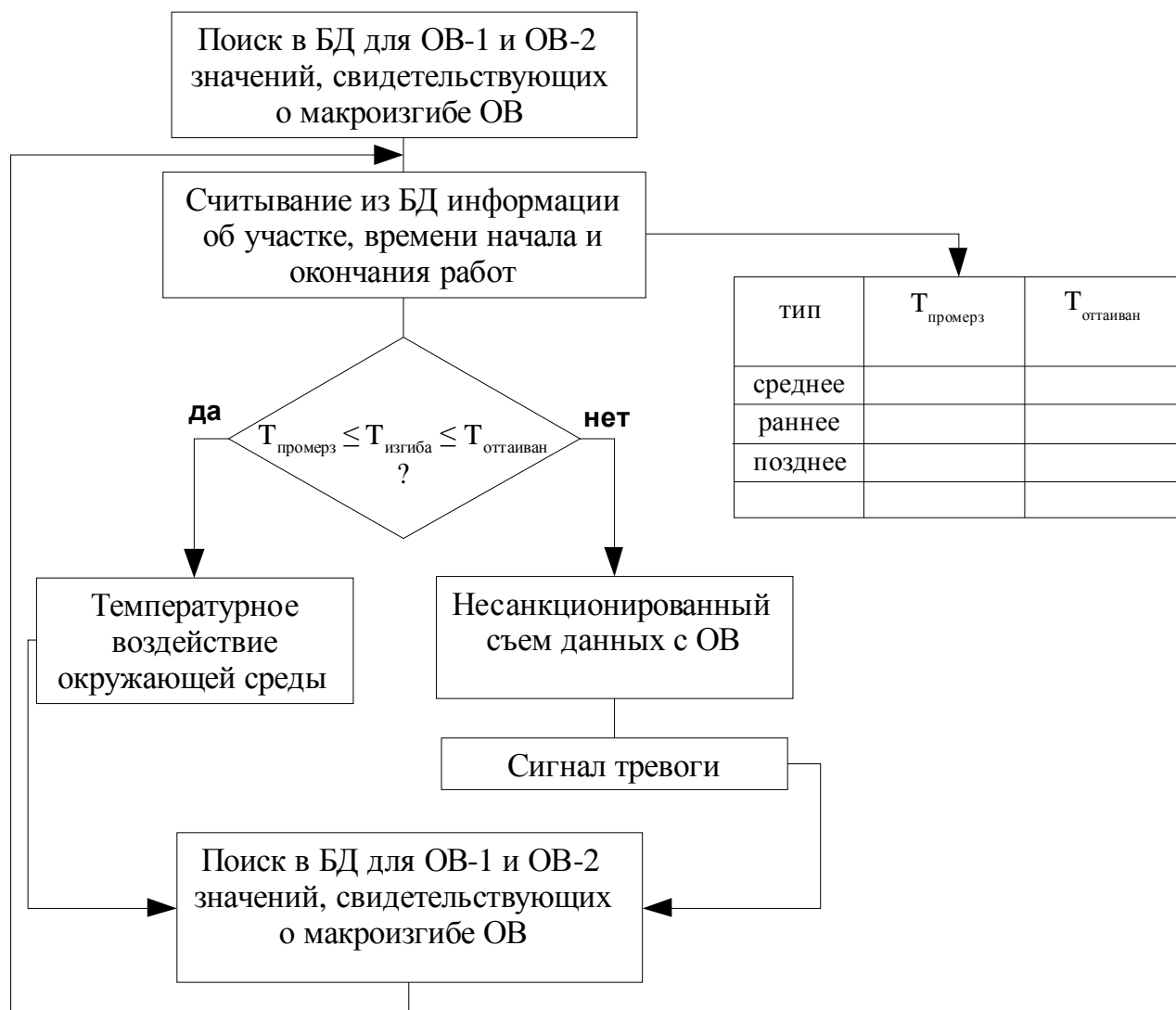


Рис.3.11 Алгоритм идентификации макроизгибов по причине температурного воздействия окружающей среды на ОБ

На рисунках 3.10 и 3.11 представлены алгоритмы, с помощью которых могут быть вынесено решение о НСД, появлении макроизгиба из-за действий обслуживающего персонала, температурного воздействия окружающей среды на ОК и ОБ. Однако, с помощью алгоритмов 3.10 и 3.10 будут получаться ошибочные результаты в том случае, если в интервале времени, совпадающем с проведением работ или замерзанием в оптической муфте воды, будет проведен НСД. Для правильной идентификации причины макроизгиба ОБ требуется дополнительная информация. Дополнительная информация может быть получена с помощью оптического рефлектометра. Использование оптического рефлектометра совместно с измерением затухания контрольных

сигналов позволяет получить более полную картину происходящего и с большей точностью выявлять причины вызвавшие рост затухания. Это связано с тем, что с помощью оптического рефлектометра можно получить координату места, где возник макроизгиб или источник роста затухания, и на основании дополнительной информации вынести решение о вызвавших причинах

На рисунке 3.12 на оси времени t показано время t_1 , в которое оператором связи началось проведение регламентных работ на оптическом разветвителе ОР-1. Предположим, что работы проводятся в летнее время, когда «нормальной» причиной появления макроизгибов ОВ может быть неаккуратные действия обслуживающего персонала. В интервале времени $[t_1; t_2]$ на входе каждого ОСБ возможно увеличение затухания по причине макроизгиба ОВ. Предположим, что в интервале времени $[t_1; t_2]$ в муфте М2 возник НСД. В результате работы алгоритма 3.10 будет получено, что причиной роста затухания являются действия обслуживающего персонала, что ошибочно.

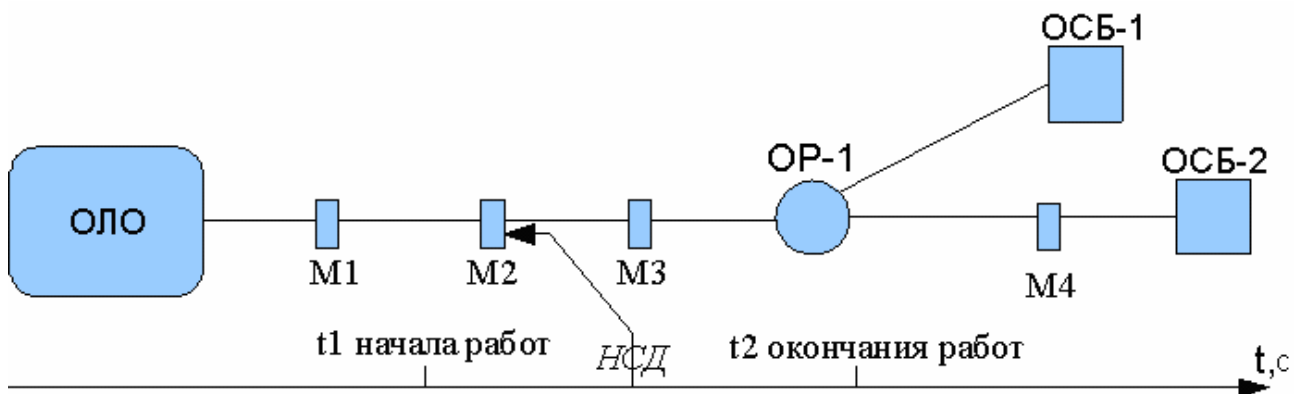


Рис.3.12 Иллюстрация несанкционированного доступа, начало которого попадает в область проведения оператором связи регламентных работ

Рассмотрим алгоритм, представленный на рисунке 3.13. После обнаружения в i -м маршруте источника затухания, вызванного макроизгибом, для дополнительного анализа используется оптический рефлектометр. В том случае, если будет установлено, что рост затухания произошел не в месте проведения регламентных работ, что соответствует месту ОР-1, а на оптической муфте М2, чего в нормальных условиях быть не должно, в результате работы алгоритма 3.13 будет получено, что причиной является НСД.

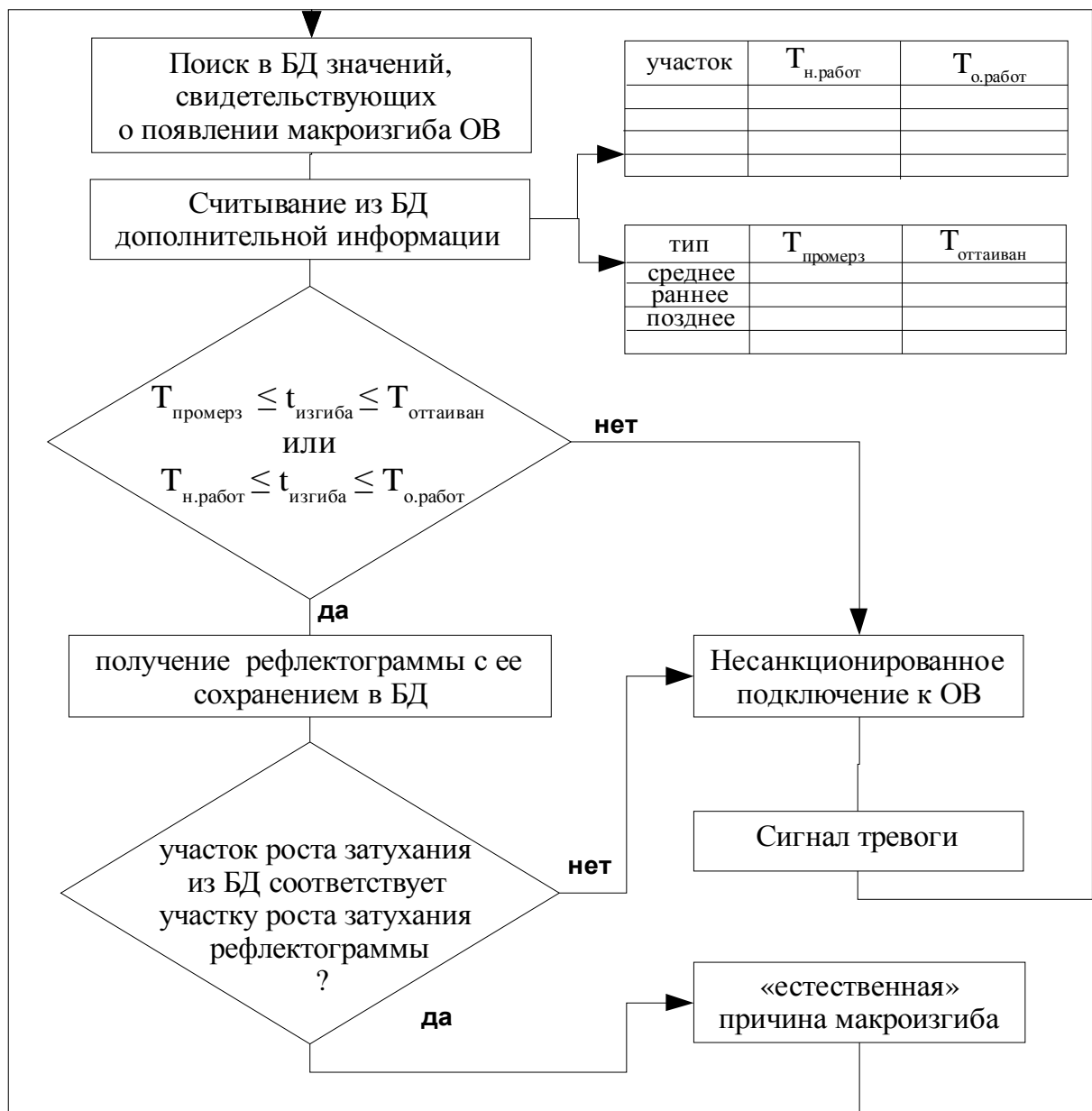


Рис.3.13 Алгоритм обнаружения НСД с дополнительным анализом рефлектограммы

Координата макроизгиба определяется путем сравнения текущей рефлектограммы с эталонной. В том случае, если в ВОЛС существует вероятность появления макроизгибов ОВ вследствие «естественных причин», несанкционированное подключение может быть идентифицированного исходя из следующих критериев:

- время появления макроизгиба;
- место появления макроизгиба;

-функции изменения затухания по причине макроизгиба с течением времени.

Выводы к главе 3

В третьей главе был получен критерий и алгоритмы, позволяющие идентифицировать макроизгиб ОВ среди других причин, вызывающих увеличение затухания оптических излучений. В первой главе было подтверждено, что прирост затухания определяется радиусом изгиба ОВ, а также длиной волны оптического излучения. Изменяя радиус изгиба ОВ, можно получить зависимость прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ. Если известны зависимости величины прироста затухания от радиуса изгиба ОВ для двух длин волн, то по величине прироста затухания двух оптических излучений можно установить, является ли причиной роста затухания макроизгиб ОВ. Для этого по величине прироста затухания каждого оптического излучения вычисляется соответствующая величина радиуса изгиба ОВ. В дальнейшем полученные радиусы изгиба сравниваются между собой. В случае равенства радиусов, причина скорее всего вызвана изгибом ОВ. Для подтверждения того, что причиной одновременного роста затухания двух оптических излучений является изгиб ОВ, необходимо выполнение дополнительного условия. Радиус изгиба, соответствующий отношению величин прироста затухания двух оптических излучений должен быть равен радиусам изгиба, полученным по величинам прироста затухания двух оптических излучений.

В ОСД возможны естественные причины появления макроизгибов ОВ, которые не связаны с НСД. Для идентификации НСД через макроизгиб ОВ были получены критерии, методика и алгоритм, с помощью которых решается задача по уменьшению числа ложных срабатываний системы обнаружения НСД.

Глава 4. Исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину погрешности в точках исследуемого интервала

4.1 Влияния аппроксимирующей функции при МНК на величину погрешности в точках исследуемого интервала

В первой главе было проведено исследование по изучению влияния радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических сигналов с разной длиной волны, а также проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными из аналитического выражения (1.8). В результате было установлено, что величина относительной погрешности может достигать 15%. При фиксированном радиусе изгиба ОВ величина погрешности будет определяться длиной волны оптического излучения. Наличие большой величины погрешности приводит к тому, что выражения (3.3) и (3.4) будут давать ошибочный результат.

Любой эксперимент ограничен характеристиками оборудования, что отражается на количестве и точности получаемых результатов. Вероятность того, что в результате реального НСД радиус изгиба ОВ будет совпадать с одним из радиусов, полученным в эксперименте, мала. Для установления причины роста затухания контрольных сигналов необходимо иметь аналитическую зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ, с помощью которой по величине прироста затухания каждого контрольного сигнала можно установить соответствующий радиус изгиба ОВ. Полученные к настоящему времени аналитические зависимости величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ имеют расхождения с результатами эксперимента, что ограничивает их применение.

Для получения аналитического выражения, описывающего зависимость прироста затухания в ОВ от радиуса изгиба ОВ, было решено пойти другим путем. Для этого был проведен эксперимент, в котором с шагом $\Delta_{\text{исследования}}=1$

мм изменялось значение радиуса изгиба ОВ. На входе приемников контрольных сигналов при фиксированном радиусе изгиба ОВ измерялись уровни мощности двух контрольных сигналов. Зная значения уровней мощности контрольных сигналов при отсутствии изгиба в ОВ и при текущем значении $R_{\text{изгиба}}$, были получены величины прироста затухания каждого контрольного сигнала. Изменяя величину $R_{\text{изгиба}}$, была получена таблично заданная зависимость величины прироста затухания каждого контрольного сигнала от $R_{\text{изгиба}}$ ОВ. Дальнейшая задача сводилась к получению аналитического выражения путем аппроксимации полученных результатов. Для стандартного одномодового волокна SMF 28 было проведено исследование влияния величины радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания двух контрольных сигналов с $\lambda_{\text{контр1}}=1.55$ мкм и $\lambda_{\text{контр2}}=1.31$ мкм, схема которого приведена на рисунке 4.1

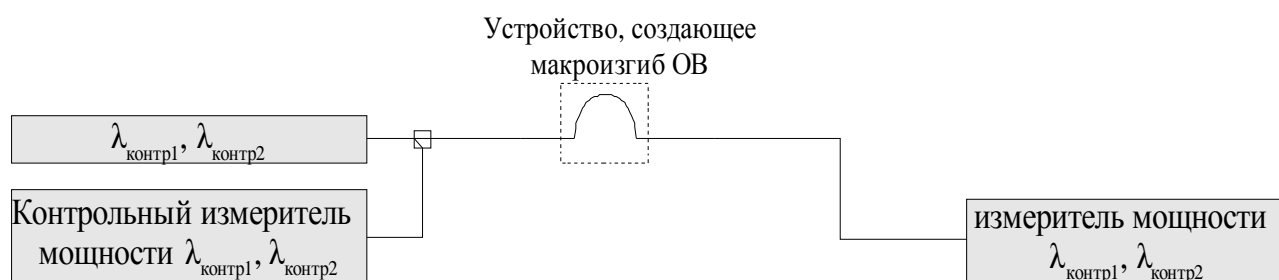


Рис.4.1 Схема лабораторного стенда

Перед подключением к ОВ устройства, создающего макроизгиб ОВ, в ВОЛС было измерено затухание контрольных сигналов при отсутствии изгиба в ОВ. После этого было подключено устройство, создающее изгиб ОВ, и для изменяющейся величины $R_{\text{изгиба}}$ были получены соответствующие величины приростов затухания контрольных сигналов. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.1. Устройство, создающее изгиб ОВ, представленное на рисунке 4.1 отличается от того, что использовалось в 1 главе, см. рисунок 1.7. В отличие от устройства, изображенного на рис. 1.7, устройством, представленным на рисунке 4.1, создавался не виток ОВ с заданным радиусом, а половина витка. Это больше соответствует тому, что можно получить в

случае НСД с ОВ.

Таблица 4.1

$R_{\text{изгиба}}, \text{ мм}$	$\Delta\alpha_{1.55}, \text{ дБ}$	$\Delta\alpha_{1.31}, \text{ дБ}$
8	3.69	1.46
9	3.21	1.20
10	2.83	0.96
11	2.32	0.77
12	1.93	0.60
13	1.56	0.45
14	1.19	0.34
15	0.89	0.25
16	0.64	0.15
17	0.43	0.09
18	0.28	0.05

Далее была поставлена задача аппроксимации таблично заданной функции так, чтобы для всех $R_{\text{изгиба}}$ принадлежащих интервалу $[R_{\text{изгиба-min}} ; R_{\text{изгиба-max}}]$ выполнялось условие:

$$\frac{|\Delta\alpha_{\text{анпр}}(R_{\text{изгиба}_i}) - \Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}_i})| \cdot 100\%}{\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}_i})} \rightarrow 0 \quad (4.1)$$

Аппроксимация— математический метод, состоящий в замене одних математических объектов другими, в том или ином смысле близкими к исходным, но более простыми. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов (например, таких, характеристики которых легко вычисляются или свойства которых уже известны).

Графическая иллюстрация результатов эксперимента, приведенных в таблице 4.1, представлена на рисунке 4.2.

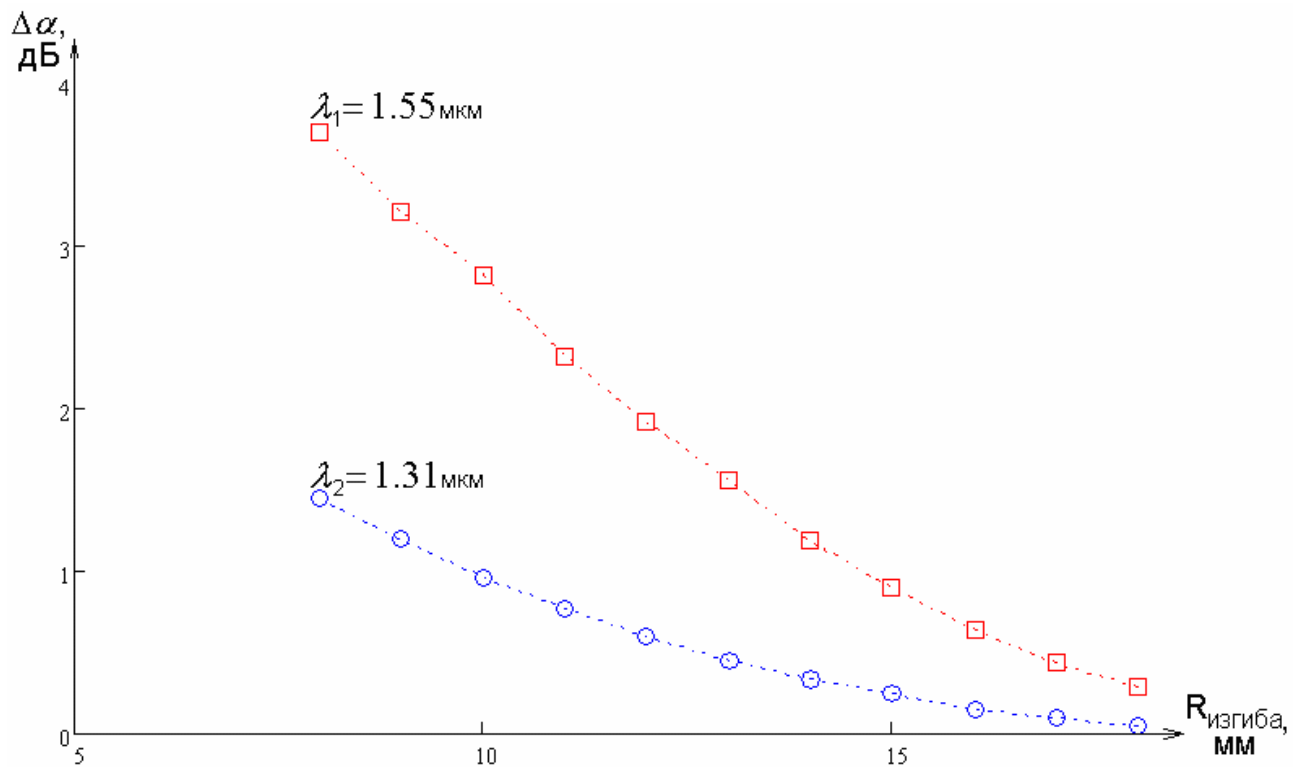


Рис.4.2 Зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ

Результаты, представленные на рисунке 4.2, показывают, что характер зависимостей $\Delta\alpha_{\lambda 1}(R_{\text{изгиба.}}), \Delta\alpha_{\lambda 2}(R_{\text{изгиба.}})$ близок к экспоненциальному. Рассмотрим метод получения аналитического выражения функции, используя аппроксимацию экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Сформулируем задачу приближения: для функции $\Delta\alpha_{\text{табл}}$, заданной таблицей, найти функцию $\Delta\alpha_{\text{аналит}}$, определенного вида так, чтобы сумма квадратов Φ была наименьшей.

$$\Phi = \sum_i (\Delta\alpha_{\text{табл}-i} - \Delta\alpha_{\text{аналит}}(R_{\text{изгиба}-i}))^2 \rightarrow \min$$

Рассмотрим метод нахождения приближающей функции в общем виде на примере аппроксимирующей функции с тремя параметрами:

$$y = F(x, a, b, c) \quad (4.2)$$

Пусть $F(x_i, a, b, c) = y_i, i=1, 2, \dots, n$.

Сумма квадратов разностей соответствующих значений f и F будет иметь вид:

$$\sum_i [y_i - F(x_i, a, b, c)]^2 = \Phi(a, b, c) \quad (4.3)$$

Эта сумма является функцией $\Phi(a, b, c)$ трех переменных (параметров a, b и c). Задача сводится к отысканию ее минимума. Используем необходимое условие экстремума:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial c} = 0 \quad (4.4)$$

Получаем систему для определения неизвестных параметров a, b, c .

$$\begin{cases} \sum_i [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_a(x_i, a, b, c) = 0 \\ \sum_i [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_b(x_i, a, b, c) = 0 \\ \sum_i [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_c(x_i, a, b, c) = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Решив систему трех уравнений с тремя неизвестными относительно параметров a, b, c , получим конкретный вид искомой функции $F(x, a, b, c)$. Как видно из рассмотренного примера, изменение количества параметров не приведет к искажению сущности самого подхода, а выразится лишь в изменении количества уравнений в системе (4.5).

Значения найденной функции $F(x, a, b, c)$ в точках x_1, x_2, \dots, x_n , будут отличаться от табличных значений y_1, y_2, \dots, y_n . Значения разностей $y_i - F(x_i, a, b, c) = \varepsilon_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) называются отклонениями измеренных значений y от вычисленных. Для найденной эмпирической формулы $y=F(x)$ в соответствии с исходной

таблицей можно найти сумму квадратов отклонений $\sigma = \sum_i (\varepsilon_i)^2$, или среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n [P_m(x_i) - y_i]^2} \quad (4.6)$$

которое в соответствии с методом наименьших квадратов для заданного вида приближающей функции (и найденных значений параметров) должно быть наименьшим. Из двух разных приближений одной и той же табличной функции, следуя методу наименьших квадратов, лучшим нужно считать то, для которого сумма (4.3) имеет наименьшее значение.

В экспериментальной практике в качестве приближающих функций в зависимости от характера точечного графика f часто используются приближающие функции с двумя параметрами:

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. $y = ax + b$ | 6. $y = a \cdot \ln x + b$ |
| 2. $y = ax^2 + bx + c$ | 7. $y = \frac{a}{x} + b$ |
| 3. $y = ax^n$ | 8. $y = \frac{x}{ax + b}$ |
| 4. $y = ae^{mx}$ | |
| 5. $y = \frac{1}{ax + b}$ | |

Очевидно, что когда вид приближающей функции установлен, задача сводится только к отысканию значений параметров. Предположим, что связь между $R_{\text{изгиба}}$ и $\Delta\alpha$ линейна и искомую приближающую функцию будем искать в виде:

$$\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}}, a, b) = a \cdot R_{\text{изгиба}} + b$$

На основании данных таблицы 4.1 для $\lambda=1.55$ была получена следующая аппроксимирующая функция :

$$\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}}) = 0.276 \cdot R - 3.905$$

Найдем среднеквадратичное отклонение полученной функции. Для этого сначала получим значение аппроксимирующей функции в каждой из точек $R_{\text{изгиба}}$, далее вычислим $\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}_i}) - \Delta\alpha_i$ и найдем значение среднеквадратичного отклонения. Результаты приведены в таблице 4.2:

Таблица 4.2

$R_{\text{изгиб}},$ мм	$\Delta\alpha_{1.55},$ дБ	$\Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{lin}},$ дБ	$ \Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{lin}} - \Delta\alpha_{1.55} ,$ дБ	$(\Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{lin}} - \Delta\alpha_{1.55})^2$
8	3.69	3.416	0.2783	0.0775
9	3.21	3.101	0.1092	0.0119
10	2.83	2.764	0.0633	0.004
11	2.32	2.443	0.1193	0.0142
12	1.93	2.098	0.172	0.0296
13	1.56	1.758	0.1932	0.0373
14	1.19	1.399	0.2111	0.0446
15	0.89	1.054	0.1588	0.0252
16	0.64	0.686	0.0504	0.0025
17	0.43	0.308	0.1271	0.0161
18	0.28	-0.043	0.3269	0.1069

Подставив результаты из таблицы 4.2 в формулу (4.6), получим, что

$$\sigma_{\text{lin-1.55}} = 0,1834$$

На основании данных таблицы 4.1 для $\lambda=1.31$ мкм была получена следующая аппроксимирующая функция :

$$\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиб}}) = 0.109 \cdot R_{\text{изгиб}} - 1.647$$

Найдем среднеквадратичное отклонение полученной функции. Для этого сначала получим значение аппроксимирующей функции в каждой из точек $R_{\text{изгиб}}$, далее вычислим $\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиб}i}) - \Delta\alpha_i$ и найдем значение среднеквадратичного отклонения. Результаты приведены в таблице 4.3:

Таблица 4.3

$R_{\text{изгиб}},$ мм	$\Delta\alpha_{1.31},$ дБ	$\Delta\alpha_{\text{apr}1.31\text{lin}},$ дБ	$ \Delta\alpha_{\text{apr}1.31\text{lin}} - \Delta\alpha_{1.31} ,$ дБ	$(\Delta\alpha_{\text{apr}1.31\text{lin}} - \Delta\alpha_{1.31})^2$
8	1.46	1.24271	0.2133	0.0455
9	1.20	1.11838	0.0826	0.0068
10	0.96	0.98532	0.0233	0.0005
11	0.77	0.85881	0.0888	0.0079
12	0.60	0.72248	0.1215	0.0148
13	0.45	0.58834	0.1353	0.0183
14	0.34	0.44655	0.1106	0.0122
15	0.25	0.31023	0.0622	0.0039
16	0.15	0.16517	0.0112	0.0001
17	0.09	0.01576	0.0812	0.0066
18	0.05	-0.12275	0.1758	0.0309

Подставив результаты из таблицы 4.3 в формулу (4.6), получим, что

$$\sigma_{\text{lin-1.31}} = 0,1158$$

Предположим, что связь между $R_{\text{изгиба}}$ и $\Delta\alpha$ имеет экспоненциальную зависимость, искомую приближающую функцию будем искать в виде:

$$\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}}, a, m) = a \cdot e^{R_{\text{изгиба}} \cdot m}$$

На основании данных таблицы 4.1 для $\lambda=1.55$ мкм была получена следующая аппроксимирующая функция :

$$\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}}) = \exp^{-3.828} \cdot \exp^{0.201 \cdot R_{\text{изгиба}}}$$

Найдем среднеквадратичное отклонение полученной функции. Для этого сначала получим значение аппроксимирующей функции в каждой из точек $R_{\text{изгиба}}$, далее вычислим $\Delta\alpha_{\text{apr}}(R_{\text{изгиба}_i}) - \Delta\alpha_i$ и найдем значение среднеквадратичного отклонения. Результаты приведены в таблице 4.4:

Таблица 4.4

$R_{\text{изгиба}},$ мм	$\Delta\alpha_{1.55},$ дБ	$\Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{exp}},$ дБ	$ \Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{exp}} - \Delta\alpha_{1.55} ,$ дБ	$(\Delta\alpha_{\text{apr}1.55\text{exp}} - \Delta\alpha_{1.55})^2$
8	3.69	4.48491	0.7909	0.6255
9	3.21	3.5661	0.3561	0.1268
10	2.83	2.79028	0.0367	0.0013
11	2.32	2.20974	0.1143	0.0131
12	1.93	1.7186	0.2074	0.043
13	1.56	1.34201	0.223	0.0497
14	1.19	1.03329	0.1547	0.0239
15	0.89	0.80363	0.0914	0.0083
16	0.64	0.61504	0.021	0.0004
17	0.43	0.46693	0.0319	0.001
18	0.28	0.36169	0.0777	0.006

Подставив результаты из таблицы 4.4 в формулу 4.6, получим, что

$$\sigma_{\text{lin-1.55}} = 0,2859$$

На основании данных таблицы 4.1 для $\lambda=1.31$ мкм была получена следующая аппроксимирующая функция :

$$\Delta\alpha_{apr}(R_{изгиба}) = \exp^{-6.146} \cdot \exp^{0.254 \cdot R_{изгиба}}$$

Найдем среднеквадратичное отклонение полученной функции. Для этого сначала получим значение аппроксимирующей функции в каждой из точек $R_{изгиба}$, далее вычислим $\Delta\alpha_{apr}(R_{изгиба_i}) - \Delta\alpha_i$ и найдем значение среднеквадратичного отклонения. Результаты приведены в таблице 4.5:

Таблица 4.5

$R_{изгиба}$, мм	$\Delta\alpha_{1.31}$, дБ	$\Delta\alpha_{apr1.31exp}$, дБ	$\Delta\alpha_{apr1.31exp} - \Delta\alpha_{1.31}$, дБ	$(\Delta\alpha_{apr1.31exp} - \Delta\alpha_{1.31})^2$
8	1.46	1.79245	0.3364	0.1132
9	1.20	1.3419	0.1409	0.0199
10	0.96	0.98439	0.0224	0.0005
11	0.77	0.73322	0.0368	0.0014
12	0.60	0.5338	0.0672	0.0045
13	0.45	0.39059	0.0624	0.0039
14	0.34	0.28077	0.0552	0.0031
15	0.25	0.20441	0.0436	0.0019
16	0.15	0.14582	0.0082	0.0001
17	0.09	0.10297	0.006	0
18	0.05	0.07459	0.0216	0.0005

Подставив результаты из таблицы 4.5 в формулу 4.6, получим, что

$$\sigma_{lin-1.31} = 0,1163$$

Выше были представлены аналитические выражения, полученные с помощью аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов, когда в каждом из представленных случаев аппроксимирующая функция была представлена простой функцией. При заданном виде аппроксимирующей функции в узлах аппроксимации были получены различные величины абсолютной и относительной погрешности. Для СОНП величина погрешности аппроксимации является критичной величиной, что связано с методикой обнаружения макроизгибов и НСД.

На принимающей стороне для двух контрольных сигналов фиксируются величины изменения затухания по сравнению с ожидаемыми значениями. Эти величины подставляются в соответствующие аналитические выражения,

которые, как отмечалось выше, получаются путем аппроксимации экспериментальных данных. В том случае, если аналитические выражения получены абсолютно верно, результатом подстановки значения функции в аналитическое выражение будет аргумент, в нашем случае радиус изгиба ОВ. В случае появления в ОВ макроизгиба значения аргумента, полученные из двух аналитических выражений, в таком случае будут совпадать.

Рассмотрим случай, когда в узлах аппроксимации имеется погрешность между результатами эксперимента и значениями из аппроксимирующего аналитического выражения. При том же характере воздействия, что и в ранее проведенных экспериментах, на принимающей стороне будут фиксироваться результаты, совпадающие с результатами эксперимента или незначительно отличающиеся. Однако, при подстановке этих величин в соответствующие аналитические выражения, полученные с помощью аппроксимации экспериментальных данных, величины аргумента для двух контролирующих сигналов будут отличаться как от истинного значения, так и друг от друга. Это будет справедливо как для узлов аппроксимации, так и для точек, лежащих между узлами аппроксимации. Это в свою очередь приводит к неопределенности: прирост затухания вызван тем воздействием, для которого в ходе исследования путем аппроксимации экспериментальных данных было получено аналитическое выражение или другими факторами. На первый взгляд проблему можно решить, проанализировав результаты абсолютной погрешности в известных точках – узлах аппроксимации. Задавшись максимальной величиной погрешности можно выработать следующий критерий: в том случае, если на принимающей стороне для двух контролирующих сигналов фиксируется рост затухания и получаемые из значений прироста затуханий величины аргумента отличаются не более чем на заранее известную величину максимальной абсолютной погрешности, то выносится решение, что причиной прироста является макроизгиб ОВ. В противном случае выносится решение, что причиной прироста является другое

событие.

Недостаток данного подхода заключается в следующем. В том случае, если в лабораторных условиях было получено максимально возможное количество узлов аппроксимации между узлами аппроксимации остаются точки, для которых отсутствуют измеренные значения. В приведенных выше таблицах, отражающих результаты эксперимента, величина радиуса изгиба менялась с шагом равным 1 мм. В том случае, если злоумышленник имеет возможность осуществлять воздействия с аргументом, попадающим между значениями аргумента эксперимента, существует вероятность не обнаружения такого воздействия по причине не попадания величины погрешности получаемых результатов в ранее установленный интервал. В том случае, когда можно оценить характер погрешности аппроксимации для всех точек, лежащих, в том числе и между узлами аппроксимации, можно снизить количество случаев, когда несанкционированное подключение будет не обнаружено. Имея возможность оценки погрешности между узлами аппроксимации, для заданного количества узлов аппроксимации, ограниченного техническими возможностями используемого оборудования, можно подобрать аппроксимирующую функцию, величина абсолютной погрешности которой на всем заданном интервале будет стремиться к нулю.

4.2 Получение приближенной математической модели зависимости величины прироста затухания от значения радиуса изгиба ОВ

Оценка правильности выбора аппроксимирующей функции может быть осуществлена с помощью следующих шагов:

1. Задается некоторое аналитическое выражение, близкое к исследуемому процессу;
2. Подставим в пункт №1 аргумент, увеличивающийся или уменьшающийся с некоторым шагом. Получим значения функции в заданных точках, из

которых составляем таблицу, в первой колонке величина аргумента, во второй колонке значение функции;

3. Представляем полученные значения графически, приближенно определяем ту функцию, с помощью которой будем проводить аппроксимацию так, если бы не были известны функции, входящие в истинное аналитическое выражение;
4. Проводим аппроксимацию полученных в пункте 2 табличных данных в результате чего будет получена аппроксимирующая функция.

В том случае, если аппроксимирующая функции будет близка к истинной, то величины абсолютных и относительных погрешностей в узлах аппроксимации и точках между ними будут стремиться к нулю. В том случае, если, например, истинная линейная функция, заданная таблицей, будет аппроксимирована с помощью экспоненциальной или показательной функции, величина абсолютной погрешности в узлах аппроксимации будет существенно выше, чем в случае, когда аппроксимация будет проводиться линейной функцией.

На основании результатов, полученных в главе 4.1, можно выдвинуть гипотезу, что ни одна из рассмотренных выше простых функций не является близкой к истинной функции, описывающий исследуемый процесс, так как в этом случае величины абсолютных погрешностей стремились к нулю. Гипотеза может быть подтверждена предшествующими заключениями. Следовательно, аппроксимирующая функция должна быть сложной и может представлять собой функцию вида:

$$\Delta\alpha(R_{изг}) = a \cdot F_1(R_{изг}) + b \cdot F_2(R_{изг}) + c \cdot F_3(R_{изг}) + \dots z \cdot F_n(R_{изг}) \quad (4.7)$$

где $F_1 \dots F_n$ - простые функции или комбинации простых функций; $a, b, c \dots z$ - коэффициенты при каждой функции

Не имея представления о функциях, входящих в общее выражение,

описывающее прирост затухания в оптическом волокне от величины угла изгиба ОВ, наиболее очевидным при поиске близкой к истинной аппроксимирующей функции будет метод подбора и комбинации простых функций, с помощью которых можно получить схожую по виду функцию. Данный способ представляется трудоемким и мало эффективным по причине большого количества шагов, необходимых для получения требуемого результата. С другой стороны, недостаток поиска аппроксимирующей функции с помощью подбора связан с тем, что в крайнем случае будет получено аналитическое выражение, проходящее через узлы аппроксимации. Однако нет никакой гарантии, что в точках, находящихся между узлами аппроксимации погрешности стремятся или равны нулю.

Сформулируем следующую задачу. Для таблично заданной функцией, аналитическое выражение которой заранее известно, но не используется при поиске функций, с помощью которых будет проводиться аппроксимация, получить такую аппроксимирующую функцию, погрешность которой в узлах аппроксимации и в точках между узлами аппроксимации стремилась бы к нулю. Вторым условием, предъявляемым к аппроксимирующей функции, будет наименьшее значение максимальной величины абсолютной и относительной погрешности на всем исследуемом интервале по сравнению с другими аппроксимирующими функциями. Зададимся дополнительными условиями.

Необходимо, чтобы аналитическое выражение функции, для которой осуществляется поиск наилучшего аппроксимирующего выражения, было сложной функцией. Это позволит приблизиться к условиям, близким к действительности, при которых тот или иной процесс редко описывается известной простой функцией.

Необходимо, чтобы аналитическое выражение исследуемой функции было аппроксимирующей функцией результатов реального эксперимента. Последнее условие требуется для того, чтобы решение поставленной задачи было применимо к результатам реального эксперимента.

Пусть в ходе эксперимента были получены таблично заданные функции, аргументы и значения которых совпадают с результатами исследования влияния изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических излучений на двух длинах волн, передающихся по ОВ:

Таблица 4.6

R_{изг}, мм	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Δα_{1,31}, дБ	1,46	1,20	0,96	0,77	0,60	0,45	0,34	0,25	0,15	0,09	0,05
Δα_{1,55}, дБ	3,69	3,21	2,83	2,32	1,93	1,56	1,19	0,89	0,64	0,43	0,28

Через полученные точки необходимо провести аппроксимирующие функции $y_{1.55}(x)$, $y_{1.31}(x)$ которые являются линейной комбинацией простых функций, представленных ниже:

$$f1(x) = x^2, \quad f2(x) = x \cdot \ln(2x) + \log(5x), \quad f3(x) = \exp^{0.5x}$$

Выбор простых функций произволен, однако, он удовлетворяет условиям поставленной задачи:

1. Аппроксимирующая функция должна быть сложной и представлять линейную комбинацию простых функций. Это позволит лучше оценить точность приближения конкретным видом аппроксимирующей функции.
2. Простые функции, входящие в состав аппроксимирующей функции, должны быть такими, чтобы вид аппроксимирующей функции был близок к ее истинному виду.

Построим матрицу значений базисных функций в заданных точках. Для двух таблично заданных функций матрица будет иметь одинаковый вид:

$$A := \begin{pmatrix} f1(x_1) & f2(x_1) & f3(x_1) \\ f1(x_2) & f2(x_2) & f3(x_2) \\ f1(x_3) & f2(x_3) & f3(x_3) \\ f1(x_4) & f2(x_4) & f3(x_4) \\ f1(x_5) & f2(x_5) & f3(x_5) \\ f1(x_6) & f2(x_6) & f3(x_6) \\ f1(x_7) & f2(x_7) & f3(x_7) \\ f1(x_8) & f2(x_8) & f3(x_8) \\ f1(x_9) & f2(x_9) & f3(x_9) \\ f1(x_{10}) & f2(x_{10}) & f3(x_{10}) \\ f1(x_{11}) & f2(x_{11}) & f3(x_{11}) \end{pmatrix}$$

Коэффициенты выбранных базисных функций будут определяться из выражения:

$$c_{155} := (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot y \text{ для первой функции, соответствующей } \lambda=1.55 \text{ мкм}$$

$$c_{131} := (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot y_u \text{ для второй функции, соответствующей } \lambda=1.31 \text{ мкм}$$

Отсюда получаем, что для функции, соответствующей $\lambda=1.55$ мкм

$$C_1=0.012, \quad C_2= - 0.042, \quad C_3=2.766 \cdot 10^{-7}$$

Для функции, соответствующей $\lambda=1.31$ мкм

$$C_1=4.041 \cdot 10^{-3}, \quad C_2= - 0.016, \quad C_3=5.959 \cdot 10^{-7}$$

Тогда математические модели двух таблично заданных функций, полученные в результате аппроксимации, будут иметь вид:

$$y_{155}(R) = 0.012 \cdot R^2 - 0.042 \cdot (R \cdot \ln(2R) + \log(5R)) + 2.766 \cdot 10^{-7} \exp^{0.5R}$$

$$y_{131}(R) = 4.041 \cdot 10^{-3} \cdot R^2 - 0.016 \cdot (x \cdot \ln(2R) + \log(5R)) + 5.959 \cdot 10^{-7} \exp^{0.5R}$$

Представим полученные результаты графически:

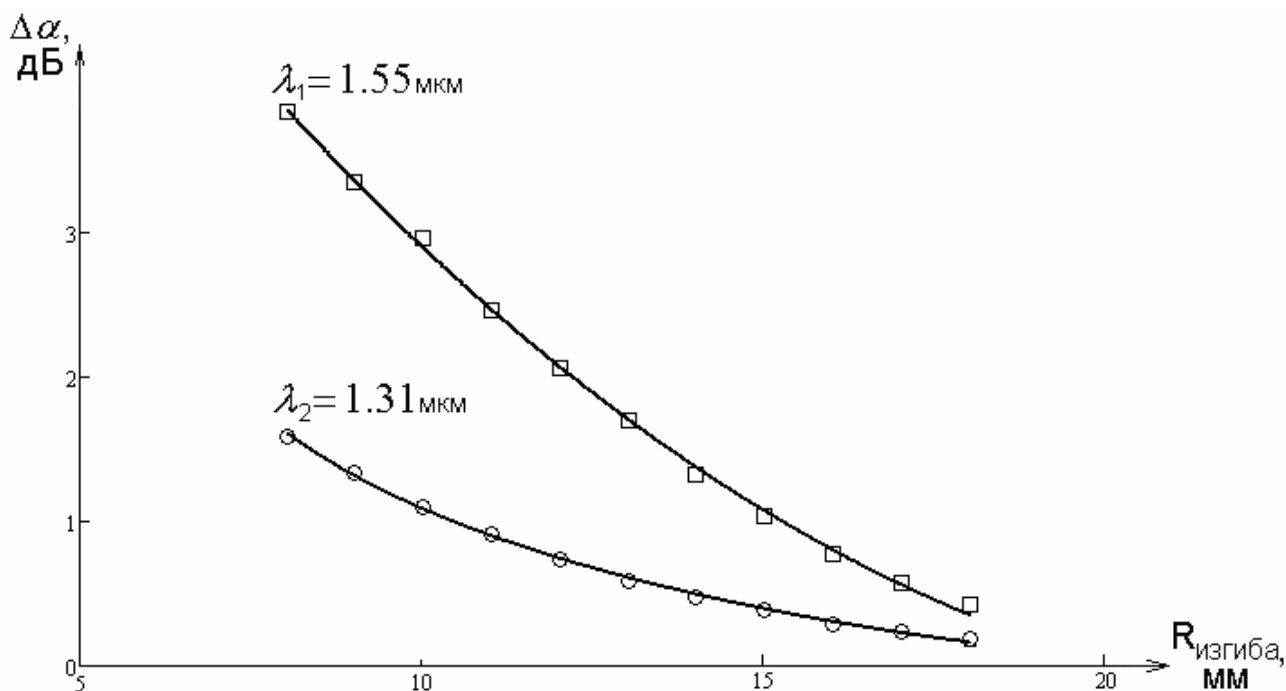


Рис.4.3 Аппроксимация экспериментальных данных сложной функцией

Результаты, приведенные на рисунке 4.3, показывают, что характер зависимости аппроксимирующей функции, представленной линейной комбинацией простых функций совпадает с результатами эксперимента. В связи с этим вопрос о том, какая из рассматриваемых аппроксимирующих функций ближе к истинному виду, продолжает оставаться актуальным.

Исследуем поведение погрешности в точках, лежащих между узлами аппроксимации, при аппроксимации одних и тех же данных различными аппроксимирующими функциями. Для этого поступим следующим образом. Поместим полученные математические модели в так называемый «двухполюсник», на вход которого подается аргумент, а на выходе получается значение функции. Схему установки, представленную на рисунке 4.2 можно представить в виде такого же двухполюсника. Отличие состоит в том, что реальных условиях мы ограничены разрешающей способностью измерителя оптической мощности и шагом устройства, создающего макроизгиб ОВ, а в случае математического двухполюсника таких ограничений нет. Если в эксперименте величина изменения радиуса изгиба ОВ была ограничена 1 мм, то

в случае, когда двухполюсника с математической функцией, аргумент может принимать любые значения.

Подадим на вход математических двухполюсников значения аргумента из таблицы 4.1. Тогда получим таблично заданные функции $\Delta\alpha_{\text{mod}-1.55}(R_{\text{изгиба}})$, $\Delta\alpha_{\text{mod}-1.31}(R_{\text{изгиба}})$ зависящие от одного и того же аргумента, что совпадает с условиями реально проведенного эксперимента.

Проведем аппроксимацию полученных таблично заданных функций с помощью тех же простых функций, с помощью которых проводилась аппроксимация экспериментальных данных в главе 4.1. Получим следующие аппроксимирующие функции:

Для случая, соответствующего $\lambda=1.55$ мкм, при аппроксимации полиномом 2-й, 3-й, 4-й степени:

$$y_{ap155kv}(R) = 0.906 - 0.219 \cdot R + 0.012 \cdot R^2$$

$$y_{ap155kub}(R) = -1.226 + 0.113 \cdot R - 4.522 \cdot 10^{-3} \cdot R^2 + 2.756 \cdot 10^{-4} \cdot R^3$$

$$y_{ap155tchet}(R) = 3.117 - 0.789 \cdot R + 0.064 \cdot R^2 - 2.033 \cdot 10^{-3} \cdot R^3 + 2.85 \cdot 10^{-5} \cdot R^4$$

Для случая, соответствующего $\lambda=1.31$ мкм, при аппроксимации полиномом 2-й, 3-й, 4-й степени:

$$y_{ap131kv}(R) = 1.337 - 0.198 \cdot R + 7.586 \cdot 10^{-3} \cdot R^2$$

$$y_{ap131kub}(R) = -3.027 + 0.48 \cdot R - 0.027 \cdot R^2 + 5.641 \cdot 10^{-4} \cdot R^3$$

$$y_{ap131tchet}(R) = 6.441 - 1.486 \cdot R + 0.124 \cdot R^2 - 4.47 \cdot 10^{-3} \cdot R^3 + 6.213 \cdot 10^{-5} \cdot R^4$$

Для случая, соответствующего $\lambda=1.55$ мкм, при аппроксимации экспоненциальной функцией:

$$y_{ap155exp}(R) = \exp^{-3.992} \cdot \exp^{0.208 \cdot R}$$

Для случая, соответствующего $\lambda=1.31$ мкм, при аппроксимации экспоненциальной функцией:

$$y_{ap131exp}(R) = \exp^{-6.873} \cdot \exp^{0.286 \cdot R}$$

Рассмотрим поведение погрешности приближения экспериментальных данных аппроксимирующими функциями на интервале [8;18] с шагом 0.01 мм для математической модели, соответствующих $\lambda=1.55$ мкм:

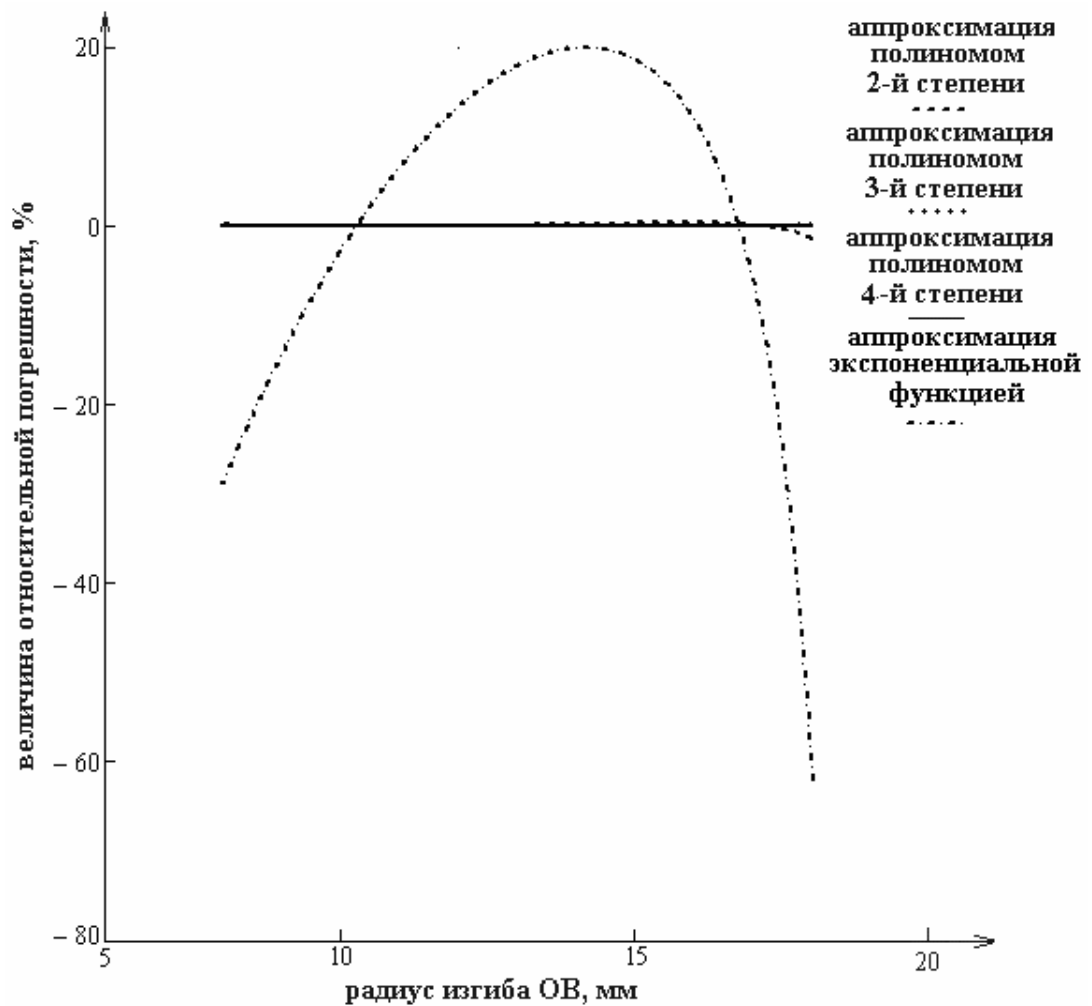


Рис.4.4. Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных различными аппроксимирующими функциями для $\lambda=1.55$

Рассмотрим поведение погрешности приближения экспериментальных данных аппроксимирующими функциями на интервале [8;18] с шагом 0.01 мм для математической модели, соответствующих $\lambda=1.31$ мкм:

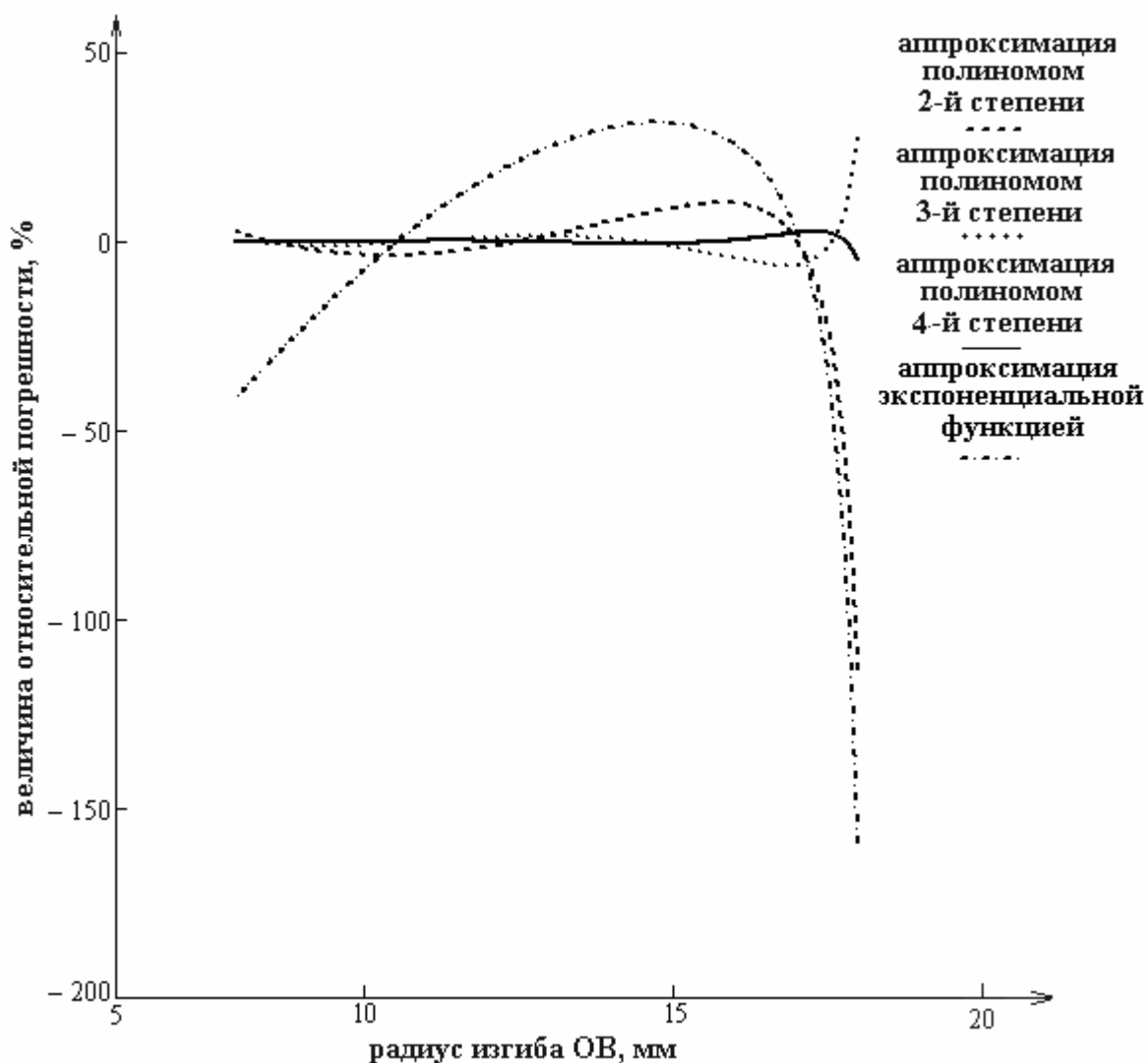


Рис.4.5. Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных различными аппроксимирующими функциями для $\lambda=1.31$ мкм

На рисунке 4.4 и 4.5 представлены графики зависимости погрешности приближения от радиуса изгиба ОВ при аппроксимации экспериментальных данных различными аппроксимирующими функциями. Очевидно, что выбор экспоненциальной функции для аппроксимации экспериментальных данных является наименее удачным, так как погрешность приближения в этом случае может превышать 100%. На рисунке 4.6 и 4.7 представлены зависимости погрешности приближения экспериментальных данных от радиуса изгиба ОВ для случая, когда аппроксимация таблично заданной функции осуществляется полиномом 2-й, 3-й и 4-й степени.

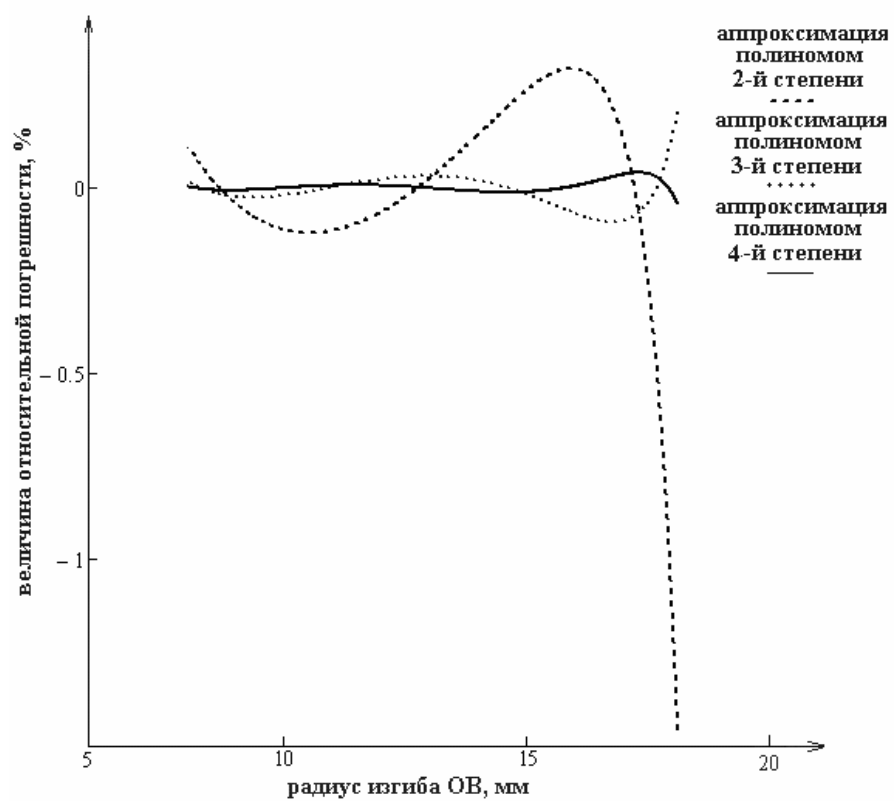


Рис.4.6 Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных полиномами различных степеней для $\lambda=1.55$ мкм

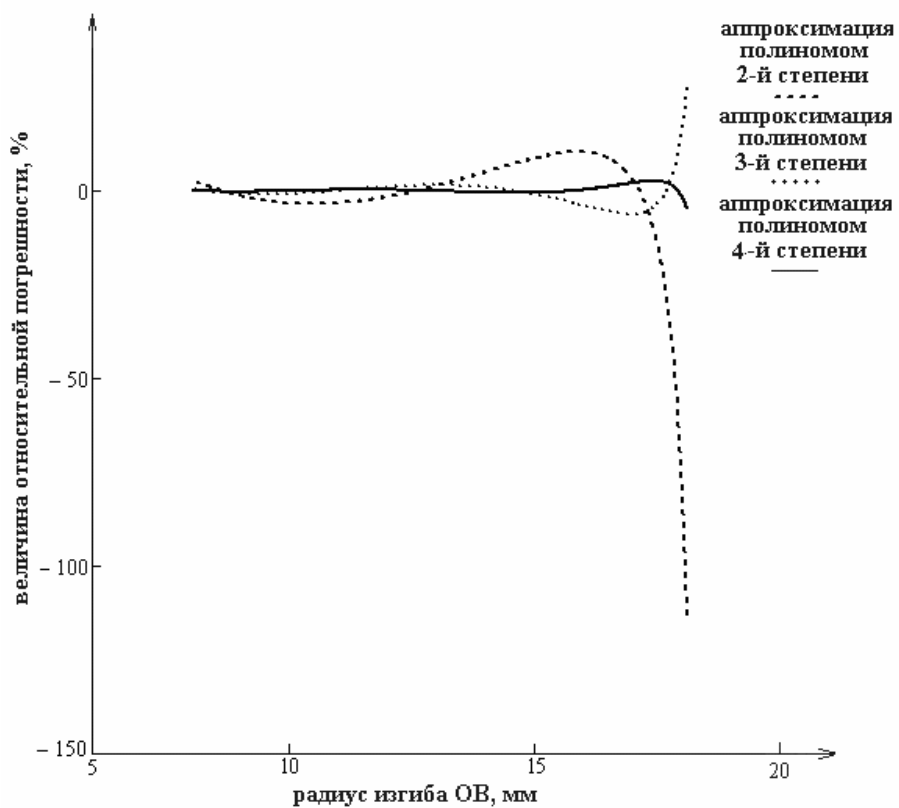


Рис.4.7 Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных полиномами различных степеней для $\lambda=1.31$ мкм

Результаты, приведенные на рисунке 4.6 и 4.7 показывают, что среди рассмотренных аппроксимирующих функций минимальным значением погрешности на всем интервале исследования обладает полином 4-й. Однако, если для математической модели, соответствующей $\lambda=1.55$ мкм, максимальная величина относительной погрешности не превышает 0.04%, то для $\lambda=1.31$ мкм максимальная величина достигает 4 %.

4.3 Влияния степени сплайна на величину погрешности в точках исследуемого интервала

Для представления экспериментальных данных в виде аналитического выражения используют аппроксимацию сплайнами различных степеней.

Во многих задачах сплайны являются более естественным аппаратом приближения, чем многочлены. К таким задачам относятся практически важные задачи интерполирования и сглаживания функций, численного дифференцирования, численного интегрирования функций, а также численного интегрирования дифференциальных уравнений. В теоретических исследованиях сплайны появляются как решение различного рода вариационных задач теории приближений (задачи о поперечниках).

Сплайнами называют функции, «склеенные» из «кусков» многочленов. Функция $s(t)$, заданная и непрерывная на отрезке $[a;b]$, называется полиномиальным сплайном (или просто сплайном) порядка m ($m=1, 2, \dots$) с узлами t_i ($i = 1, \dots, n$; $a < t_1 < t_2 < \dots < t_n < b$), если на каждом из промежутков $[a;t_1]$, $[t_i;t_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, $[t_n, b]$ $s(t)$ есть алгебраический многочлен степени, не превосходящей m , а в каждой из точек t_i некоторая производная $s^{(v)}(t)$ ($1 \leq v \leq m$) может иметь разрыв [66,67].

Максимальная по всем частичным отрезкам степень многочленов называется степенью сплайна, а разность между степенью сплайна и порядком наивысшей непрерывной на $[a;b]$ производной — дефектом сплайна.

Функция S называется кубическим интерполяционным сплайном, если:

а) на каждом отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ функция S является кубическим многочленом:

$$S(x) \equiv S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$$

$$\text{для } x \in [x_i, x_{i+1}], \quad i = 0, \dots, N-1$$

б) соседние многочлены гладко состыкованы между собой:

$$S^{(r)}_{i-1}(x_i - 0) = S^{(r)}_{i-1}(x_i + 0), \quad i = 0, \dots, N-1, \quad r = 0, 1, 2$$

в) если сплайн проходит через узлы аппроксимации:

$$S(x_i) = f(x_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N$$

Коэффициенты многочлена на каждом интервале определяют из условий в узлах. В условии «в» было указано, что в узлах многочлен должен принимать табличные значения функции:

$$f(x_{i-1}) = S(x_{i-1}) = a_i, \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.8)$$

$$f(x_i) = S(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3, \quad h_i = x_i - x_{i-1} \quad (4.9)$$

Число этих уравнений вдвое меньше числа неизвестных коэффициентов, поэтому для определенности задачи нужны дополнительные условия. Для их получения вычисляют первую и вторую производные многочлена

$$S'(x) = b_i + 2c_i(x - x_{i-1}) + 3d_i(x - x_{i-1})^2$$

$$S''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_{i-1}) \quad \text{при } x_{i-1} \leq x \leq x_i$$

и накладывают условие непрерывности производных во всех точках, включая узлы. Приравнявая во внутреннем узле x_i правые и левые пределы производных, получают:

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i^2, \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (4.10)$$

$$c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i, \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (4.11)$$

Недостающие два условия обычно получают из естественного предположения о нулевой кривизне графика на концах:

$$\frac{1}{2}S''(x_0) = c_1 = 0, \quad \frac{1}{2}S''(x_N) = c_N + 3d_N h_N = 0 \quad (4.12)$$

Уравнения (4.8) – (4.12) образуют систему линейных уравнений для определения $4N$ неизвестных коэффициентов. Эта система уравнений может быть решена методом исключения Гаусса. Однако, полученные уравнения предварительно упрощают следующим образом. Из уравнения (4.8) можно получить сразу все коэффициенты a_i . Из уравнений (4.11) и (4.12) следует [67,70]

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{(c_{i+1} - c_i)}{3h_i}, \quad \text{при } 1 \leq i \leq N-1, \\ d_N &= -\frac{c_N}{3h_N}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Подставив соотношение (4.13) в (4.9), одновременно исключая оттуда $a_i = f_{i-1}$, получим:

$$\begin{aligned} b_i &= \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h_i} - \frac{1}{3} \cdot h_i (c_{i+1} + 2c_i), \quad 1 \leq i \leq N-1, \\ b_N &= \frac{f(x_N) - f(x_{N-1})}{h_N} - \frac{2}{3} \cdot h_N c_N. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Исключим теперь из (4.10) величины b_i и b_{i+1} при помощи (4.14), соответственно увеличивая во втором случае индекс на единицу, а величину d_i ; — на основании (4.13). Останется система линейных уравнений для коэффициентов c_i легко приводящаяся к следующему виду:

$$\begin{aligned}
c_1 &= 0, \\
h_{i-1} \cdot c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_i \cdot c_{i+1} &= \\
= 3 \cdot \left[\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h_i} - \frac{f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}{h_{i-1}} \right], & \text{ при } 2 \leq i \leq N, \\
c_{N+1} &= 0.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Матрица этой системы трехдиагональна, т. е. ненулевыми в ней являются только элементы главной диагонали и двух соседних. Такие системы экономно решаются методом прогонки. После нахождения коэффициентов c_i остальные коэффициенты вычисляются по формулам (4.8), (4.13), (4.14).

Воспользовавшись теорией, с помощью которой описывается поведение сплайна между узловыми точками, задача по аппроксимации экспериментальных данных линейным сплайном в математическом пакете MathCAD будет решаться с помощью следующей программы [67,70]:

$$f_{\text{linear}}(z) := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow \text{rows}(x) - 1 \\ \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad d \leftarrow y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot (z - x_i) \text{ if } z \geq x_i \wedge z \leq x_{i+1} \\ \quad d \end{array} \right.$$

Для аппроксимации экспериментальных данных квадратичным сплайном использовалась следующая программа MathCAD:

$\underline{\underline{A}} := \left \begin{array}{l} n \leftarrow \text{rows}(x) \\ \text{for } i \in 0..3(n-1)-1 \\ \quad \text{for } j \in 0..3(n-1)-1 \\ \quad \quad M_{i,j} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n-1 \\ \quad \text{for } j \in 0..1 \\ \quad \quad \text{for } k \in 0..2 \\ \quad \quad \quad M_{2 \cdot i-1+j, 3 \cdot i-3+k} \leftarrow (x_{i-1+j})^k \\ \text{for } i \in 1..n-2 \\ \quad \text{for } j \in 0..1 \\ \quad \quad \text{for } k \in 0..1 \\ \quad \quad \quad M_{2(n-1)+i, 3 \cdot i-2+k+j \cdot 3} \leftarrow (-1)^j (2 \cdot x_i)^k \\ M_{0,2} \leftarrow 1 \\ M \end{array} \right $	$Y := \left \begin{array}{l} n \leftarrow \text{rows}(x) \\ \text{for } i \in 0..3(n-1)-1 \\ \quad M_i \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..n-2 \\ \quad \text{for } j \in 0..1 \\ \quad \quad M_{2 \cdot (i+1)-1+j} \leftarrow Y_{i+j} \\ M \end{array} \right $
$f_{\text{quadratic}}(z) := \left \begin{array}{l} n \leftarrow \text{rows}(x) \\ \text{for } i \in 0..n-2 \\ \quad \text{if } z \leq x_{i+1} \wedge z \geq x_i \\ \quad \quad \left \begin{array}{l} d \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..2 \\ \quad d \leftarrow d + C_{3 \cdot i+j} \cdot z^j \end{array} \right \\ d \end{array} \right $	$\underline{\underline{C}} := A^{-1} \cdot Y$

Подставив в функции $f_{\text{linear}}^{(z)}$, $f_{\text{quadratic}}^{(z)}$ вместо z величину радиуса изгиба ОВ, для каждого вида кубического сплайна можно получить соответствующее значение величины прироста затухания оптического излучения. На рисунках 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 приведены зависимости величины погрешности аппроксимации экспериментальных данных от радиуса изгиба ОВ на интервале [8;18] мм при аппроксимации одних и тех же данных полиномом 4-й степени линейным, линейным, квадратичным и кубическим сплайном.

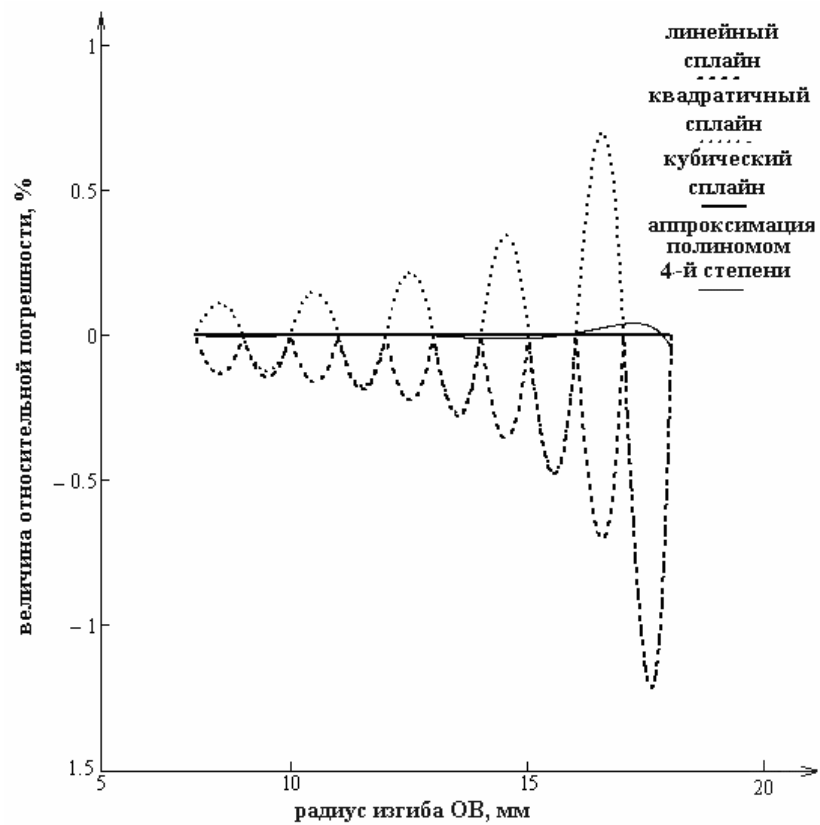


Рис.4.8 Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных полиномом 4-й степени, линейным, квадратичным и кубическим сплайном для $\lambda=1.55$ мкм

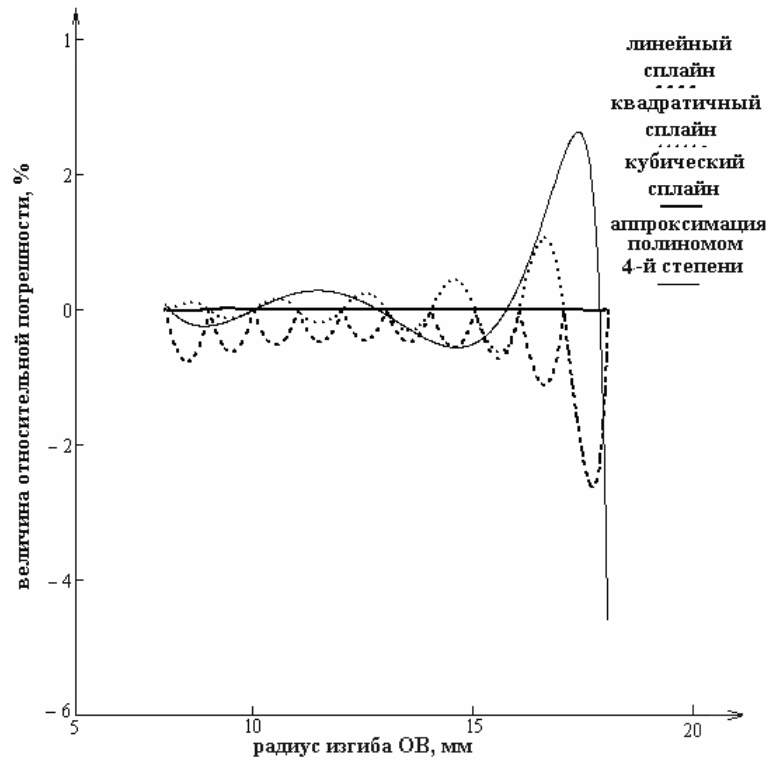


Рис.4.9 Сравнение погрешности приближения экспериментальных данных полиномом 4-й степени, линейным, квадратичным и кубическим сплайном для $\lambda=1.31$ мкм

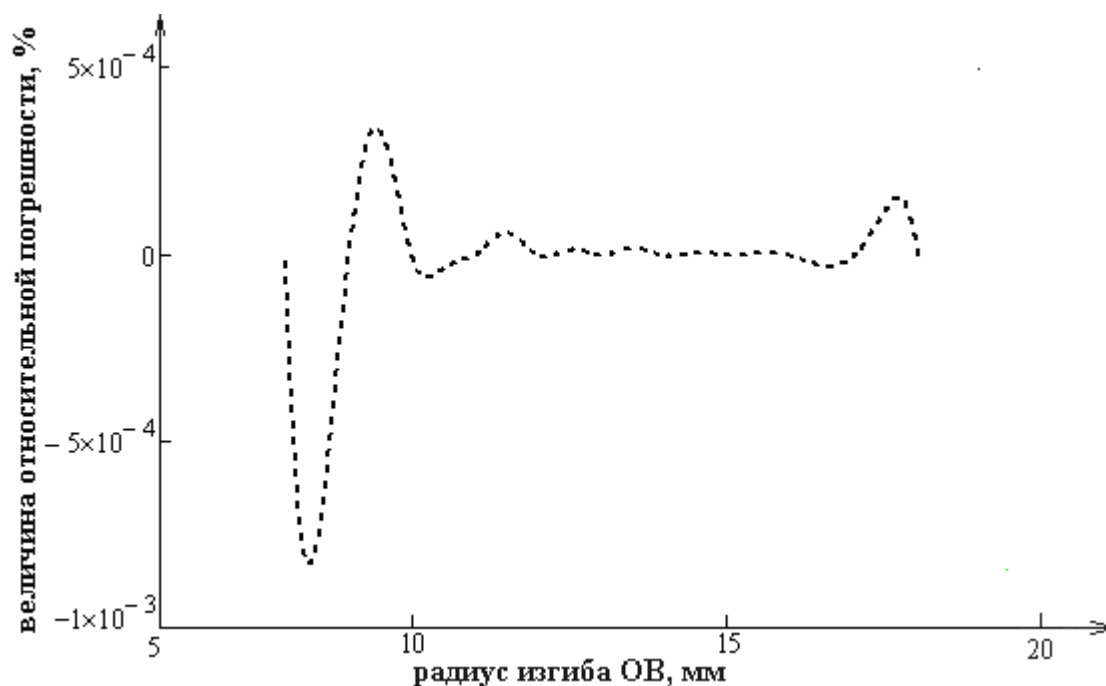


Рис.4.10 Зависимость погрешности приближения экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.55$ мкм

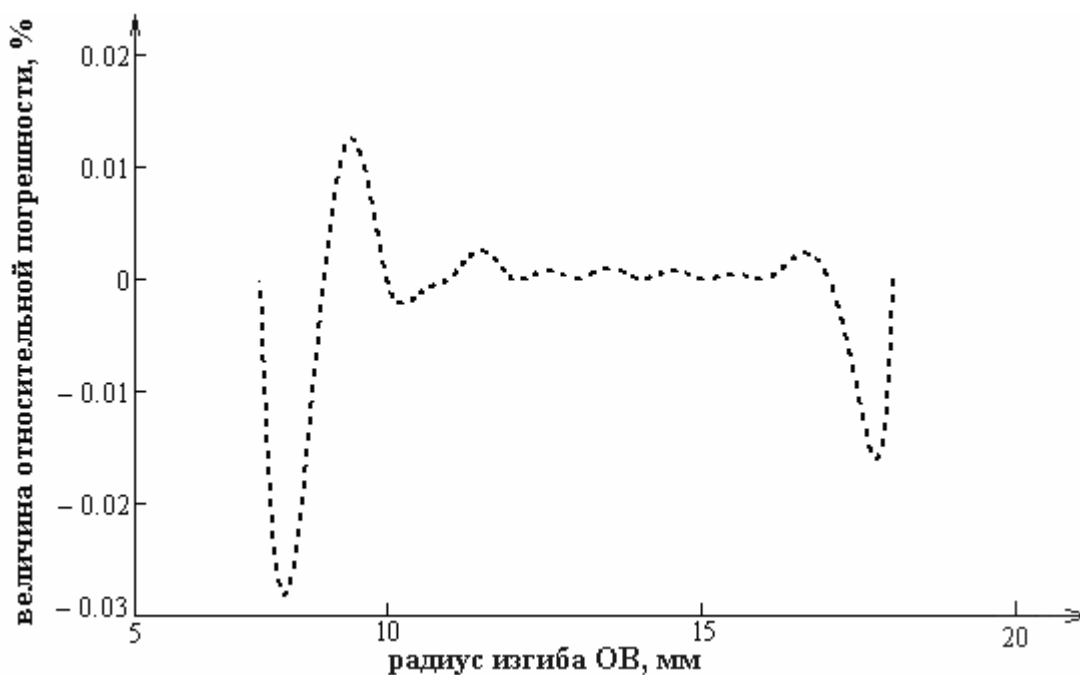


Рис.4.11 Зависимость погрешности приближения экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.31$ мкм

На основании результатов, приведенных на рисунках 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 можно сделать вывод, что в отличие от аппроксимации данных полиномом 4-й степени, аппроксимация тех же данных кубическим сплайном дает практически нулевую погрешность, максимальная величина которой для математической

модели, соответствующей $\lambda=1.55$ мкм, равна 0.001%, а для математической модели, соответствующей $\lambda=1.31$ мкм, равна 0.03%

Очевидно, что, так как получаемые в результате аппроксимации экспериментальных данных аналитические выражения обладают погрешностью, то, используя критерий идентификации макроизгиба ОВ, при радиусах изгиба ОВ, отличных от тех, что были получены в эксперименте: $R_{изгиба}(\Delta\alpha_{1.55}) \neq R_{изгиба}(\Delta\alpha_{1.31})$, в результате чего будет вынесено решение, что причиной прироста затухания является не макроизгиб ОВ. Это легко показать с помощью двух рассмотренных математических моделей, соответствующих реально проведенному эксперименту. На рисунках 4.10 и 4.11 показаны области с положительной и отрицательной величиной погрешности аппроксимации. Знак погрешности зависит от значения функции, полученной в результате аппроксимации, при некотором значении аргумента. Если значение функции больше истинного значения, то погрешность будет со знаком плюс. В том случае, если значение функции меньше истинного значения, то погрешность будет со знаком минус. При выборе аппроксимирующей функции необходимо стремиться к тому, чтобы погрешность стремилась к нулю во всех точках исследуемого интервала.

В ВОЛС возможны различные причины роста затухания оптического излучения. В третий главе получен критерий, позволяющий по величине прироста затухания двух оптических излучений установить, что причиной является изгиб ОВ. При этом подразумевается, что аналитические выражения, описывающие искомую зависимость, имеют нулевое расхождение с экспериментом. Если расхождение между результатами эксперимента и аналитическим выражением значительно, это отразится на соответствующей величине радиуса изгиба каждого оптического излучения. Величина радиуса каждого оптического излучения будет отличаться от истинного значения, величины радиусов изгиба двух оптических излучений будут отличаться между собой. По этой причине повышается вероятность принятия ошибочного

решения о причинах вызвавших рост затухания двух оптических излучений.

Выберем другой набор простых функций:

$$f_1(x) = x^2, \quad f_2(x) = \log(x), \quad f_3(x) = \frac{1}{x},$$

с помощью которого получим две математические модели, описывающие зависимость величины прироста затухания от радиуса изгиба ОВ, и исследуем влияние выбора аппроксимирующей функции на величину погрешности на исследуемом интервале:

$$\begin{aligned} y_{155}(R) &= 0.013 \cdot R^2 - 3.185 \cdot \log(R) + 20.033 \cdot \frac{1}{R} \\ y_{131}(R) &= 6.821 \times 10^{-3} \cdot R^2 - 2.469 \cdot \log(R) + 21.918 \cdot \frac{1}{R} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Ранее, с другим набором простых функций, и как следствие, с другими математическими моделями было установлено, что минимальная погрешность получалась при аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном, см. рисунок 4.10, 4.11.

На рисунке 4.12 и 4.13 приведены зависимости величины погрешности при аппроксимации данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ

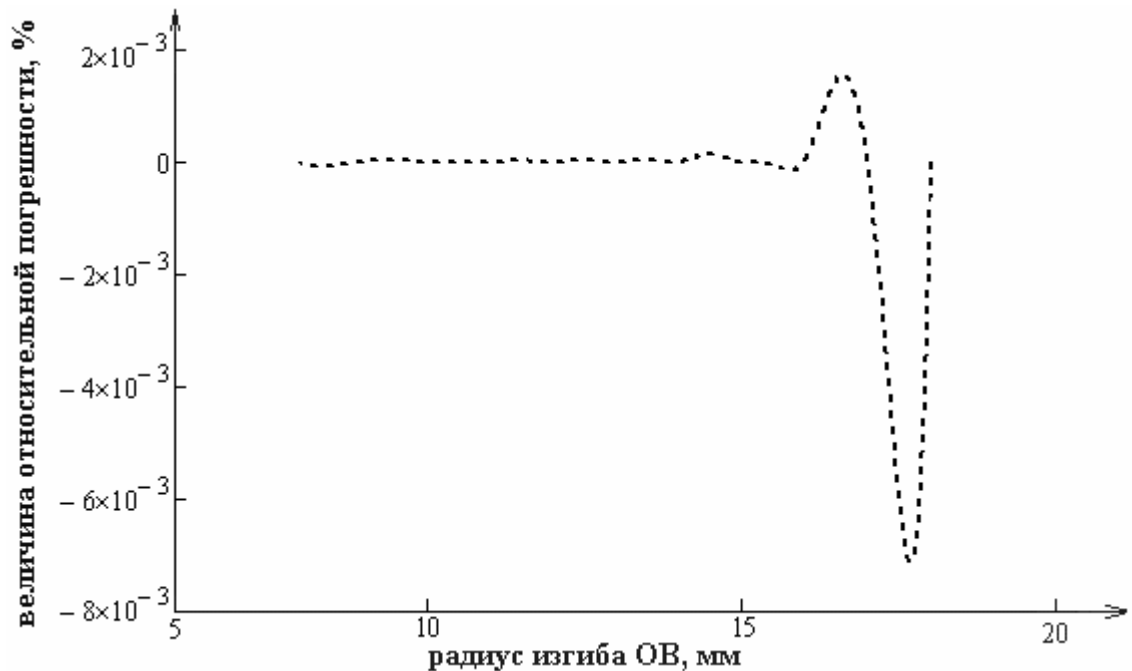


Рис.4.12 Зависимость погрешности аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.55$ мкм

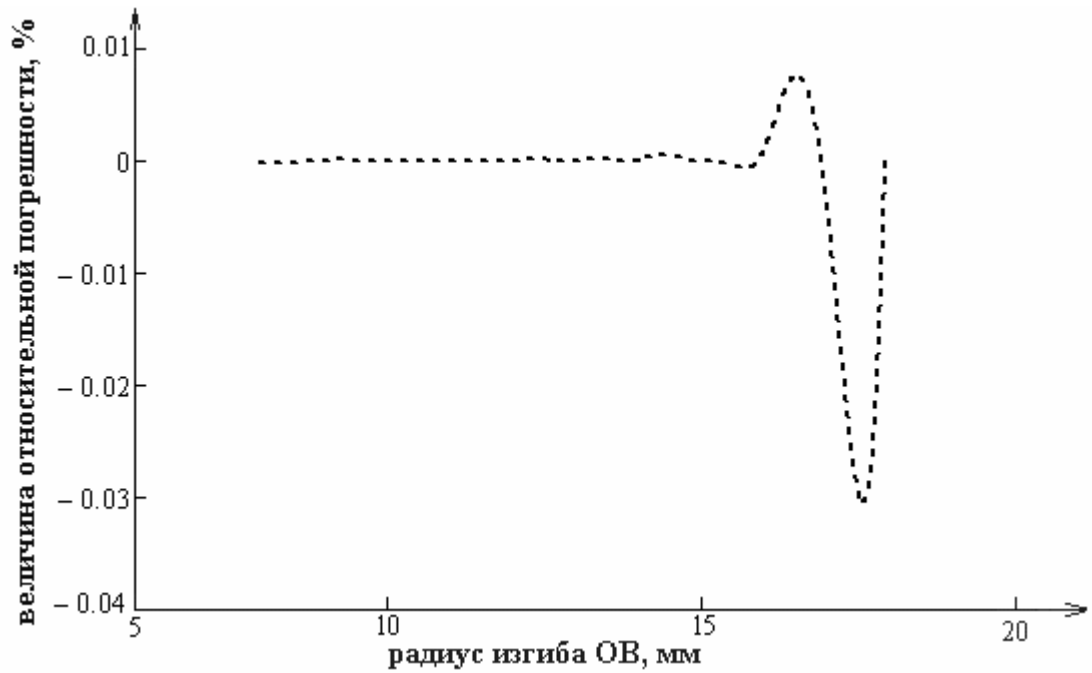


Рис.4.13 Зависимость погрешности аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.31$ мкм

Выберем другой набор простых функций:

$$f1(x) = x^2 \cdot \frac{x-1}{x+3}, \quad f2(x) = \frac{\log(x)}{x}, \quad f3(x) = \exp^{0.5 \cdot x},$$

с помощью которого получим две математические модели, описывающие зависимость величины прироста затухания от радиуса изгиба ОВ, и исследуем влияние выбора аппроксимирующей функции на величину погрешности на исследуемом интервале:

$$\begin{aligned} y_{155}(R) &= R^2 \cdot \frac{R-1}{R+3} \cdot 8.216 \times 10^{-3} - 13.021 \cdot \frac{\log(x)}{x} + 2.841 \times 10^{-6} \exp^{0.5 \cdot x} \\ y_{131}(R) &= R^2 \cdot \frac{R-1}{R+3} \cdot 2.511 \times 10^{-3} - 4.533 \cdot \frac{\log(x)}{x} + 3.16 \times 10^{-6} \exp^{0.5 \cdot x} \end{aligned} \quad (4.17)$$

На рисунке 4.14 и 4.15 приведена зависимость погрешности приближения при аппроксимации данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для двух математических моделей, соответствующих проведенному эксперименту с $\lambda=1.55$ мкм и $\lambda=1.31$ мкм.

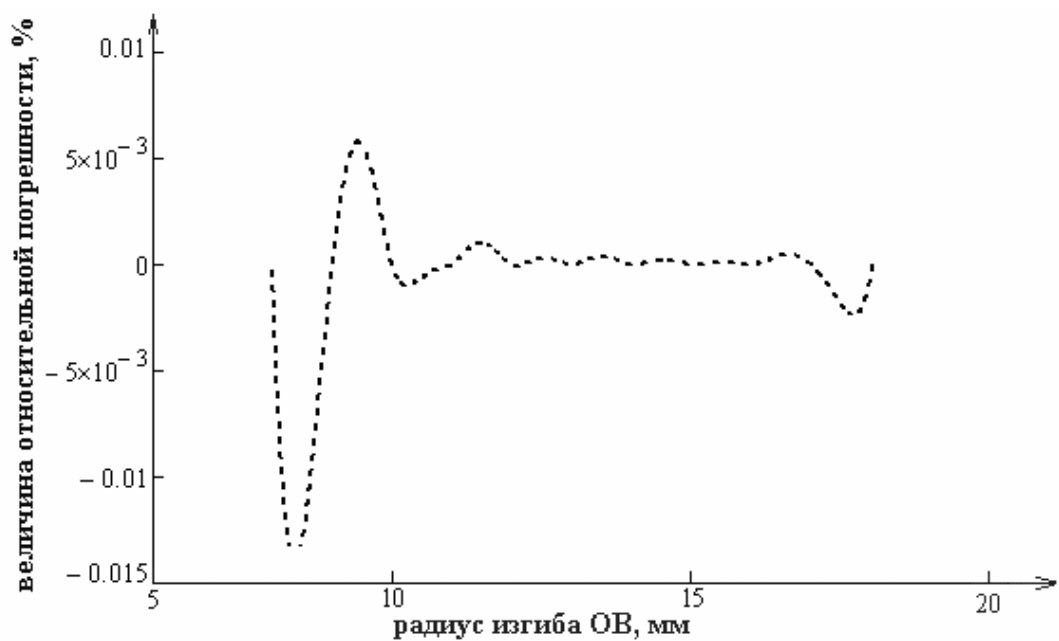


Рис.4.14 Зависимость погрешности аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.55$ мкм

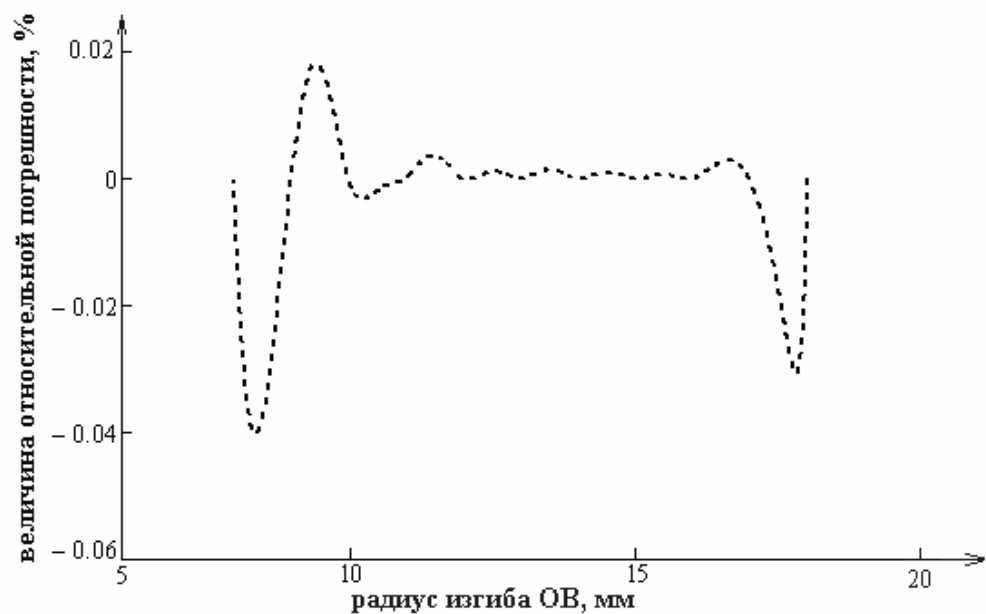


Рис.4.15 Зависимость погрешности аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном от радиуса изгиба ОВ для $\lambda=1.31$ мкм

Как показали проведенные выше исследования, аппроксимация экспериментальных данных кубическим сплайном обладает наилучшим приближением среди рассмотренных аппроксимирующих функций. При этом величина относительной погрешности аппроксимации для всех моделей реальной зависимости на всем исследуемом интервале не превышала величины

0.1%.

В выражениях 3.3 и 3.4, как было показано ранее, по величине прироста затухания оптического излучения вычисляется радиус изгиба ОВ. В том случае, если в ОВ создан макроизгиб с радиусом изгиба отличным от того, что был получен в эксперименте для получения зависимости величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ, подстановка радиуса изгиба в аналитическое выражение даст величину радиуса изгиба ОВ, отличающуюся от истинного значения. Это будет справедливо для двух оптических излучений, что приведет к тому, что условие (3.3) и (3.4) не выполняются. Невыполнение условий (3.3) и (3.4) напрямую связано с тем, что в полученных путем аппроксимации экспериментальных данных аналитических выражениях имеется погрешность аппроксимации. Для учета погрешности аппроксимирующих выражений, используемых в критерии идентификации макроизгиба ОВ, необходимо установить максимальную величину расхождения между величинами радиуса изгиба ОВ, при которых выносится решение, что причиной является макроизгиб ОВ. Тогда выражение 3.3 можно записать следующим образом:

$$|R(\Delta\alpha_{\lambda_1}) - R(\Delta\alpha_{\lambda_2})| \cdot \frac{100}{R(\Delta\alpha_{\lambda_2})} \leq R_{\text{порог}}, \quad (4.18)$$

где $R(\Delta\alpha_{\lambda_1})$ - радиус изгиба ОВ, соответствующий приросту затухания оптического излучения с длиной волны λ_1 , [мм]; $R(\Delta\alpha_{\lambda_2})$ - радиус изгиба ОВ, соответствующий приросту затухания оптического излучения с длиной волны λ_2 , [мм]; $R_{\text{порог}}$ - максимально допустимая разница между полученными значениями радиусов изгиба ОВ, [%].

Результаты, приведенные на рисунках 4.14 и 4.15 свидетельствуют о том, что максимальное расхождение между величинами радиусов изгиба будет наблюдаться в том случае, когда радиус изгиба ОВ попадает в диапазон [8;9]

мм. Для математических моделей (4.17) при $R_{изгиба} = 8.6$ мм, погрешность величины прироста затухания для $\lambda_1 = 1.55$ мкм составляет 0.014%, а для $\lambda_2 = 1.31$ мкм составляет 0.04%. Зная истинное значение функции, которое получается из (4.17) и значение функции, полученное из приближенной функции, можно оценить погрешность радиусов изгиба ОВ.

В том случае, если прирост затухания двух оптических излучений возник при значении изгиба ОВ $R_{изгиба} = 8.6$ мм, величина погрешности радиуса изгиба, получаемого из приближенного выражения, для $\lambda_1 = 1.55$ мкм составляет 0.0036%, а для $\lambda_2 = 1.31$ мкм составляет 0.007%. Значение $R_{порог}$, получаемое из (4.18) составляет 0.0033%.

Если прирост затухания двух оптических излучений возник при значении изгиба ОВ с $R_{изгиба} = 12.4$, величина погрешности радиуса изгиба, получаемого из приближенного выражения, для $\lambda_1 = 1.55$ мкм составляет 0.00027%, а для $\lambda_2 = 1.31$ мкм составляет 0.00075. Значение $R_{порог}$, получаемое из (4.18) составляет 0.00048%.

Таким образом, величина погрешности значения функции влияет на величину погрешности при обратной операции, когда по значению функции определяют величину аргумента. Для математической модели (4.17) при максимальной величине погрешности функции на всем исследуемом интервале было установлено, что погрешность аргумента не превышает величины 0.004%. Отсюда можно положить, что $R_{порог} = 0.004\%$.

.

Выводы к главе 4

Любой эксперимент ограничен характеристиками используемого оборудования, что в свою очередь приводит к ограниченному числу экспериментальных результатов, которые представляют в самом простом случае таблицу с величиной аргумента и соответствующим значением измеряемой величины. Для получения значения измеряемой величины при значениях аргумента, которые отсутствовали в эксперименте, используют аппроксимацию экспериментальных данных. Таблично заданная функция заменяется приближенным аналитическим выражением, из которого можно получить значение функции при требуемой величине аргумента. При этом, полученное значение функции имеет погрешность, которую называют погрешностью приближения. В настоящее время существуют различные способы получения приближенного аналитического выражения путем аппроксимации экспериментальных данных. В том случае, если аппроксимирующая функция подобрана верно, погрешность в узлах и между узлами аппроксимации на всем исследуемом интервале стремится к нулю. Аппроксимация экспериментальных данных простыми функциями, схожих с исследуемой зависимостью не выявил среди них лучшей, в результате чего было вынесено решение, что исследуемая зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ, сложная функция. Для оценки точности приближения каждой аппроксимирующей функции были использованы математические модели исследуемого процесса, представляющие собой сложные функции. Исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину погрешности приближения показало, что наименьшей величины относительной погрешности можно добиться путем аппроксимации экспериментальных данных кубически сплайном. При этом величину относительной погрешности во всех точках исследуемого интервала меньше 1%. Были исследованы несколько математических моделей, приближенных к результатами реального эксперимента. Для всех рассмотренных моделей

аппроксимация данных кубическим сплайном давала наименьшую величину погрешности приближения, меньше 1 %. Таким образом, для аппроксимации реальных экспериментальных данных было предложено использовать аппроксимацию кубическим сплайном. Для установления величины погрешности аппроксимации кубическим сплайном для реального эксперимента необходимо использовать оборудование, позволяющее изменять радиус изгиба ОВ с меньшим шагом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был выполнен анализ методов получения информационных сигналов с поверхности оптического волокна, а также анализ технических средств и методик, использование которых позволяет выявлять факты несанкционированных подключений применительно к сетям доступа ОСД. Было установлено, что через макроизгиб ОВ можно быстро и достаточно просто осуществить НСД. В результате исследования было подтверждено, что в сетях ОСД имеются участки с большим уровнем мощности, чем требуется для приема с требуемым коэффициентом ошибок, что повышает вероятность проведения скрытного НСД. Это предопределило необходимость создания системы обнаружения несанкционированных подключений за счет макроизгиба ОВ в сетях доступа ОСД. Было проведено исследование, направленное на изучение влияния радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания передаваемых сигналов, в результате которого был получена методика, с помощью которых может быть установлено, что рост затухания в ОВ вызван макроизгибом. Результаты исследования легли в основу системы обнаружения НСД для сетей доступа ОСД. Кроме того был проведен анализ естественных причин, в результате которых в сетях ОСД возможно возникновение, а также шагов для успешного проведения НСД. На основании полученных результатов были получены критерии, разработана методика и алгоритм обнаружения несанкционированных подключений.

Преимуществами представленной системы обнаружения несанкционированных подключений в сетях доступа ОСД является возможность непрерывного мониторинга характеристик любого сегмента сети, возможность обнаружения несанкционированного подключения на любом участке сети, уменьшилось время обнаружения неоднородности или несанкционированного подключения. Разработанная методика позволяет не только идентифицировать появление одиночного макроизгиба в i -м

направлении, но и предоставлять информацию о величине макроизгиба, а также устанавливать факты появления более 1 макроизгиба в i -м направлении.

В настоящей работе не рассматривался вопрос обнаружения несанкционированных подключений с помощью других методов получения оптических сигналов с поверхности ОВ, что вызвано сложной технической реализацией представленных методик, большей вероятностью повреждения ОВ, ограничением по скорости передаваемых информационных сигналов.

К наиболее значимым результатам, полученным в настоящей диссертационной работе, относятся:

1. Доказана возможность несанкционированного съема данных с ОВ в любом направлении в сетях доступа ОСД;
2. Выявлены недостатки систем мониторинга на базе оптического рефлектометра для обнаружения НСД в сетях ОСД;
3. Разработана система обнаружения несанкционированных подключений в сетях доступа ОСД;
4. Результаты исследования влияния макроизгибов на величину прироста затухания сигналов легли в основу методики и алгоритма идентификации макроизгибов ОВ;
5. В результате исследования были получены критерии, позволяющие идентифицировать несанкционированное подключение к ОВ;
6. На основании полученных критериев идентификации несанкционированных подключений, разработана методика и алгоритм идентификации несанкционированных подключений;
7. Обоснован выбор аппроксимирующей функции, которая позволяет уменьшить величину погрешности между результатами эксперимента и аналитического выражения;
8. Установлен вид аппроксимирующей функций, с помощью которой может быть получено аналитическое выражение зависимости прироста затухания информационного сигнала от величины радиуса изгиба ОВ.

Основные результаты работы были опубликованы в следующих трудах:

1. Алексеев Е.Б., Булавкин И.А.. Проблемы обеспечения информационной безопасности в пассивных оптических сетях доступа и пути решения этих проблем // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ – 2005. - М.: МТУСИ, 2005.- С. 187-188.
2. Алексеев Е.Б., Булавкин И.А.. Анализ обеспечения информационной безопасности в сетях на оптическом кабеле // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ – 2005. - М.: МТУСИ, 2005.- С. 188-190.
3. Булавкин И.А. Исследование возможности использования технических средств мониторинга состояния ВОЛС для обнаружения несанкционированных подключений в пассивной оптической сети доступа // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ – 2006. - М.: МТУСИ, 2006.- С. 148.
4. Булавкин И.А. Вопросы информационной безопасности сетей ОСД // Технологии и средства связи. 2006 - №2. – С. 104-108.
5. Алексеев Е.Б., Булавкин И.А. Использование концепций нейронных сетей для решения задач обнаружения несанкционированных воздействий в сетях ОСД // Технологии информационного общества: Тезисы докладов московской отраслевой научно-технической конференции. – М. Инсвязьиздат, 2007. – 263с.: ил. – С. 84-85.
6. Булавкин И.А. Мониторинг пассивных оптических сетей доступа //XV Межрегиональная научно-техническая конференция «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения»: Труды конф. – Нижний Новгород, октябрь –2007. – С. 22-25.
7. Булавкин И.А. Обнаружение несанкционированных воздействий в сетях ОСД //XV Межрегиональная научно-техническая конференция «Обработка

- сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения»: Труды конф. – Нижний Новгород, октябрь –2007. – С. 25-29.
8. Булавкин И.А.. Использование экспериментальных данных для получения зависимости прироста затухания в ОВ от угла изгиба ОВ // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ – 2007. - М.: МТУСИ, 2007.- С. 132.
 9. Булавкин И.А. Сравнительный анализ аппроксимирующих функций для решения задачи получения аналитического выражения прироста затухания в оптическом волокне от угла изгиба //Труды 2-ой Отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». – М.: МТУСИ, 2008.
 10. Булавкин И.А. Сравнительный анализ методов диагностики пассивных оптических сетей доступа применительно к задачам обнаружения несанкционированных подключений // Телекоммуникации и транспорт. – 2008. - №3. – С. 20-22.
 11. Булавкин И.А. Обнаружение макроизгибов в сетях ОСД без использования рефлектометра // Вестник связи. - 2008.- №3. - С. 54-58.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев А. ОСД многообещающая «пассивность» // Connect! – 2004. - №8.
2. Бессалов И.Е. Обнаружение неисправностей в работе компонентов DWDM-систем связи // Научно-технический журнал Lightwave Russian Edition. – 2005. - №4. – С.31-33.

3. Устранение неисправностей в сетях FTTx // Научно-технический журнал Lightwave Russian Edition. – 2005. - №4. – С.44-46.
4. Ржевский С.П. Измерения при строительстве, монтаже и техническом обслуживании ВОСП // Фотон-Экспресс. – 2005. - №5. – С.20-26
5. Рекомендация МСЭ-Т G.983.1. Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON).
6. Рекомендация МСЭ-Т G.984.1. Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics.
7. Рекомендация МСЭ-Т G.983.2. Спецификация интерфейса контроля и управления ONT для системы B-PON.
8. Securing Fiber Optic Communications against Optical Tapping Methods // www.oysteroptics.com
9. Питерских С.Э. Оптические волокна нового класса, анализ рекомендации МСЭ-Т G.656 // Научно-технический журнал Lightwave Russian Edition. – 2005. - №3. – С.25-28
10. Попов С., Шубин В., Ивченко С., Волков А., Курило А., Зайцев Н., Кращенко И. О защите информации в волоконно-оптических системах. Вопросы защиты информации: Науч.-практ.журн. / ФГПУ «ВИМИ», 1(24), 1993. С. 39-43.
11. Попов С., Шубин В., Ивченко С., Волков А., Курило А., Зайцев Н., Кращенко И. Исходные данные для построения модели съема информации, передаваемой по волоконно-оптическому тракту. Вопросы защиты информации: Науч.-практ.журн. / ФГПУ «ВИМИ», 1(24), 1993, С. 43-48.
12. Румянцев К.Е., Хайров И.Е. Передача конфиденциальной информации по волоконно-оптическим линиям связи, защищенная от несанкционированного доступа // Информационное противодействие угрозам терроризма: Научн.- практ.журн. - 2003. - №1. - С.72 – 79.
13. Корольков А. В., Кращенко И. А., Матюхин В. Г., Синев С. Г. Проблемы

- защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа // Информационное общество. 1997. - № 1. - С. 74-77
14. Гришачев В.В., Кабашкин В.Н., Фролов А.Д. Анализ каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи: нарушение полного внутреннего отражения Научно-практический журнал Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. - №4. – С.194-204.
15. Боос А. В., Шухардин О. Н. Анализ проблем обеспечения безопасности информации, передаваемой по оптическим каналам связи, и путей их решения. // Научно-практический журнал Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2005. - №5. – С.162-170.
16. Манько А., Каток В., Задорожний М. Защита информации на волоконно-оптических линиях связи от несанкционированного доступа // <http://bezpeka.com/ru/lib/spec/anot217.html>
17. Годный В.Г. Вопросы информационной безопасности в волоконно-оптических линиях связи // Системы безопасности. – 2002/ - №2(44). - С.44-47
18. <http://www.exfo.com/en/Products/Products.aspx?Id=358>
19. Бородакий Ю.В., Москалев М.К., Добродеев А.Ю. Мониторинг волоконно-оптических линейных трактов с контролем несанкционированных подключений // Сети доступа. – 2007. - №1. – С. 82-85.
20. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Дмитриев С.В., Ермоних М.И., Фурсов С.Г. Проблема защиты волоконно-оптических систем и сетей от НДС. Пути и перспективы её решения. Системы безопасности связи и телекоммуникаций / ФГУП «Концерн Системпром». - 2001. - №41(5). - С.83.
21. Islam M.N. Information Assurance in WDM Networks: Physical Layer Security/www.eecs.umich.edu/OSL/Islam/SecureComm-1.pdf
22. <http://www.cisco.com>

23. Меморандум о взаимодействии операторов электросвязи РСС в сфере обеспечения информационной безопасности информационных и телекоммуникационных сетей и систем // Сети доступа. – 2007. - №1. – С. 5-9.
24. U.S. Patent (6,265,710) // <http://www.patentstorm.us/patents/6265710.html>
25. Рекомендация МСЭ-Т G.952. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
26. Рекомендация МСЭ-Т G.955. Характеристики одномодового волоконно-оптического волокна и кабеля с ненулевым дисперсионным смещением.
27. Оптическое волокно Corning® SMF-28e+™ на базе технологии NexCor // <http://doclib.corning.com/OpticalFiber/pdf/pir1463.pdf>
28. Рекомендация МСЭ-Т G.984.2. Пассивные волоконно-оптические сети с поддержкой гигабитных скоростей передачи (ГОСД): Спецификация независимого от физической среды (PMD) уровня.
29. Криксунов Л.З. Системы информации с оптическими квантовыми генераторами, «Техшка», Киев, 1970, стр. 232.
30. Мировицкий Д.И., Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф. Микроволноводная оптика и голография, Наука, М., 1983.
31. Faustini L., Martini G. Bend Loss in Single-Mode Fibers // Journal of Lightwave Technology, vol.15, №.4, April, 1997.
32. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers // <http://www.opticsinfobase.org/viewmedia.cfm?id=84325&seq=0>
33. Gauthier R.C., Ross C. Theoretical and experimental considerations for a single-mode fiber-optic bend-type sensor // Applied Optics, vol.36, 1997.
34. Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers // Optical Society of America, vol.66, March, 1976.
35. Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory // IEEE Journal Quantum Electron, vol.29, December, 1993.

36. Vassallo C. Perturbation of an LP mode of an optical fiber by a quasi-degenerate field: a simple formula // Optical and Quantum Electronics, vol.17, №3, May, 1985.
37. Valiente I., Yassallo C. New formalism for bending losses in coated single-mode optical fibers // Electronics Letters, vol.25, October, 1989.
38. Renner H., Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach // Journal of Lightwave Technology, vol.10, №5, 1992.
39. Faustini L., Martini G. Bend loss in single-mode fibers // Journal of Lightwave Technology, vol.15, April, 1997.
40. Fiber Optic Test Equipment // www.wilcominc.com/category.cfm?catid=10
41. He G., Chen H. Novell approach of non-intrusive “clip-on” fiber monitoring // documents.exfo.com/appnotes/tnote028-ang.pdf
42. LFD-300/TG-300 // documents.exfo.com/specsheets/LFD-300-angHR.pdf
43. Родомиров Л., Скопин Ю.Г., Иванов А.Б. Методы и оборудование удаленного тестирования ВОЛС // Вестник связи. – 1998. - №5. - С. 64-71.
44. Некрасов С.Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей // Технологии и средства связи. – 2000. - №5. - С. 28-32.
45. Информация с Web-сервера компании Hewlett-Packard, <http://www.hp.com>
46. Информация с Web-сервера компании Wavetek Wandel & GOLOermann, <http://www.fiberoptics.wwg-solutions.com>
47. Информация с Web-сервера компании EXFO, <http://www.exfo.com>
48. Информация с Web-сервера компании GN Nettest, <http://www.gnnettest.com>.
49. Информация с Web-сервера ЗАО НПП «Спектр», <http://www.spc.com.ru>
50. Информация с Web-сервера JDSU // <http://www.jdsu.com>
51. Médard M., Marquis D., Chinn S.R. Attack detection in all-optical networks // Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, February, 1998.
52. Médard M., Marquis D. Attack Detection Methods for All-Optical Networks // www.isoc.org/isoc/conferences/ndss/98/medard.pdf

- 53.Свинцов А.Г, Оптимизация параметров оптического рефлектометра для обнаружения неоднородности при попытке несанкционированного доступа в ВОЛС // «Фотон-Экспресс» - Наука. – 2006. - №6. С. 56-71.
- 54.Петренко И.И., Убайдуллаев Р.Р. Пассивные оптические сети ОСД Часть 1. Архитектура и стандарты // Научно-технический журнал Lightwave Russian Edition. – 2004. - №1. – С. 22-28.
- 55.Аграфонов Ю.В., Глушков С.М., Исайкин Ю.Н. Временная эволюция свойств оптоволоконных линий передачи информации под действием механо-термических нагрузок // bsfp.iszf.irk.ru/bsfp1999/bsff2/bb05an2.php
- 56.Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле // www.ruscable.ru/doc/analytic/statya-042.html
- 57.Семёнов С. Л. Влияние герметичных покрытий световодов на их механическую прочность. // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства.- 1999. - №2.
- 58.Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002.
- 59.Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САУЙРУС СИСТЕМС, 1999.
- 60.Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
- 61.Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н., Пискунов В.В. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов // <http://www.dvo.sut.ru/libr/ls/w135byli/index.htm>
- 62.Дяченко А.А., Шушпанов О.Е., Прокофьева Л.П., Щербаков В.В. Влияние релаксационных свойств материалов первичных покрытий на прочность и долговечность световодов // Журнал радиоэлектроники. – 2004. - №4.
- 63.Семенов С.Л., Надежность, прочность, старение и деградация волоконных световодов // Волоконно-оптические технологии, материалы

- и устройства, Сборник трудов Учебно-научного центра волоконно-оптических материалов и устройств, Москва. - 2000. - № 3. - С. 47-63.
64. Gagnon N. Инновационное решение для поиска и устранения неисправностей на функционирующих FTTx сетях // www.exforussia.ru/pages.html?name=fiber-to-the_troubleshoot
65. Овсянников Л.Н. Аварийно-восстановительные работы на ВОЛС // Фотон-Экспресс. – 2000. - №20. – С. 10-12.
66. Калиткин Н.Н. Численные методы, Наука, М., 1978.
67. Волков Е.А. Численные методы, Наука, М., 1987.
68. Измерители средней мощности оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи, ОСТ 45.191-2002
69. Источники излучения измерительные для волоконно-оптических систем передачи, ОСТ 45.192-2002
70. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами, Физматлит, М., 2006.
71. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
72. Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. – М.: Физический факультет МГУ, 2002.
73. Хромой Б.П. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах (Том 1). – М.: ИРИАС, 2007.