



003456639

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2008

05 ДЕК 2008

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
Центральный научно-исследовательский институт связи (ФГУП ЦНИИС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Алексеев Евгений Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Соколов Станислав Александрович

кандидат технических наук,
Плошай Леонид Леонович

Ведущая организация: ОАО «ВНИИКП»

Защита состоится «18» декабря 2008 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.03 в Московском техническом университете связи и информатики по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.8а, ауд. А-455.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского технического университета связи и информатики.

Автореферат разослан «14» 11 2008 года.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций



Косичкина Т.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и состояние вопроса. Настоящее время характеризуется растущим спросом на широкополосные услуги связи и объемами передаваемой информации. С этим связано повсеместное развитие оптических технологий, в том числе и на «последней миле». Среди технологий, решающих задачу оптиковизации последней мили, особое место занимает технология пассивных оптических сетей доступа (ОСД). Ключевой особенностью данной технологии является использование только пассивных оптических компонентов на участке от оборудования оператора услуг – оптического линейного окончания (ОЛО) до окончного оборудования пользователя – оптического сетевого блока (ОСБ), что позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию сети.

Принято считать, что в отличие от медных кабелей, с оптического волокна (ОВ) невозможно осуществить несанкционированный съем данных (НСД). Исследования в данной области доказали обратное. Распространяясь по ОВ, оптический сигнал теряет часть своей мощности, что происходит в силу процесса рассеяния излучения на неоднородностях и поглощения материалом ОВ. Потеря оптической мощности будет также наблюдаться при внешнем воздействии на ОВ. При проектировании ВОЛС закладывается энергетический запас, который позволяет компенсировать увеличение затухания вследствие старения компонентов, восстановительных и других работ. Определенным образом воздействуя на ОВ, имеется возможность получить часть оптического излучения, распространяющегося по ОВ.

Рядом отечественных и зарубежных компаний разработаны системы мониторинга ВОЛС, в некоторых из которых реализована возможность обнаружения НСД. Большинство существующих систем мониторинга ВОЛС построены на базе оптического рефлектометра. Выявление неоднородностей и НСД осуществляется за счет сравнения текущей рефлектограммы с эталонной.

В связи с участвовавшими случаями промышленного шпионажа, с угрозами террористических актов и хакерских атак задача обеспечения информационной безопасности является одной из первоочередных. Большинство существующих систем мониторинга ВОЛС на базе оптического рефлектометра предназначены для магистральных ВОЛС. Цена готового решения может достигать сотен тысяч долларов, что делает их использование в ОСД экономически не выгодным. Использование оптического рефлектометра в пассивных ОСД имеет ряд серьезных ограничений, что связано с конструктивными особенностями ОСД. Время получения рефлектограммы занимает от десятков секунд до нескольких минут, в течение которого отсутствует информация о состоянии ОСД, что в конечном итоге отрицательно сказывается на защищенности ОСД от НСД.

С этой целью автором была разработана система обнаружения НСД, получены критерии, методика, алгоритм и аналитические выражения, с помощью

которых в ОСД решается задача обнаружения НСД с ОВ. По причине того, что наибольшую угрозу представляют устройства несанкционированного съема данных через макроизгиб ОВ, при разработке системы обнаружения основной акцент был сделан на обнаружения данного класса НСД.

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

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

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 методы теории множеств, численные методы, теория алгоритмов, теория алгебраической логики, теория систем управления базами данных (СУБД).

Личный вклад. Все основные научные положения, выводы и 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.

Реализация результатов работы. Результаты исследования, касающегося разработки системы обнаружения несанкционированных подключений в пассивных оптических сетях доступа внедрены в научно-исследовательскую работу «Разработка проекта нормативного документа «Рекомендации по построению сетей доступа на базе современных оптических технологий», а также в процесс планирования защиты ВОЛС ЗАО «БСЖВ». Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами.

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

1. «Телекоммуникационные и вычислительные системы», М., ноябрь, 2005г., М., ноябрь, 2006г., М., ноябрь, 2007г.;
2. Московская отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», Москва, апрель, 2007г.;
3. Отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», Москва, февраль, 2008г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 11 печатных трудах, включая 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 8 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 137 страницах, содержит 47 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 80 наименований.

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 добиться погрешности приближения меньше 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 сохранять результаты измерений за определенный период времени.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ методов несанкционированного съема данных с поверхности ОВ, а также проведено исследование влияния радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания оптических излучений с разными длинами волн.

К настоящему времени в России и за рубежом опубликованы работы, посвященные вопросам получения оптического излучения с поверхности ОВ, вопросам мониторинга ВОЛС и вопросам обнаружения НСД. Данные вопросы рассматривались в работах российских ученых и специалистов: А.В. Яковлева, А.Г. Свинцова, К.Е. Румянцева, И.Е. Хайрова, В.В. Гришачева, В.Н. Кабашкина, А.Д. Фролова, А. В. Бооса, О.Н. Шухардина, В.Н. Рыжовина, М.В. Лазарева, Ю.В. Бородакия, М.К. Москалева, А.Ю. Добродеева 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. Лефевра и др.

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

- методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, не создающих в ОВ локальных неоднородностей;
- методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет устройств, создающих в ОВ локальную неоднородность.

К первому классу относятся методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ за счет концентрации рэлеевского рассеяния или за счет распределенной связи двух оптических волокон. НСД на базе представленных методов достаточно сложно обнаружить, что является несомненным преимуществом. Недостатком представленных методов является то, что для получения уровня оптического излучения достаточного для работы несанкционированного приемника может потребоваться достаточная протяженность ОВ, что на практике трудно реализуемо.

Ко второму классу относятся методы получения оптического излучения с боковой поверхности ОВ с помощью устройств, создающих локальную неоднородности путем нагрева, сжатия, акустического воздействия на ОВ, создания макроизгиба ОВ. При этом уровень мощности оптического излучения сигнала на входе несанкционированного приемника определяется выражением:

$$P_{\text{вх.НСД}} = 10 \lg [K_{\text{сбора.НСД}} \cdot (10^{\frac{P_{\text{пер}}}{10}} \cdot 10^{-\frac{\alpha_{\text{сумм.ОВ}}}{10}} - 10^{\frac{P_{\text{пер}}}{10}} \cdot 10^{-\frac{\alpha_{\text{сумм.ОВ}}}{10}} \cdot 10^{-\frac{\alpha_{\text{НСД}}}{10}})] =, \quad (1)$$

$$= 10 \lg [K_{\text{сбора.НСД}} \cdot 10^{\frac{P_{\text{пер}} - \alpha_{\text{сумм.ОВ}}}{10}} (1 - 10^{-\frac{\alpha_{\text{НСД}}}{10}})]$$

где: $P_{\text{вх.НСД}}$ - уровень мощности оптического сигнала на входе приемника устройства НСД, [дБм]; $P_{\text{пер}}$ - уровень мощности оптического сигнала на выходе ОЛО, [дБм]; $\alpha_{\text{сумм.ОВ}}$ - суммарные потери в ОВ от ОЛО до точки НСД, [дБ];

$\alpha_{нсд}$ - затухание, вносимое устройством НСД, [дБ]; $K_{сбора.НСД}$ - коэффициент сбора оптической мощности, излучаемой ОВ на локальную неоднородности.

Недостатком методов, относящихся ко второму классу, является возможность повреждения ОВ, а также появление новой неоднородности в ОВ, которая может быть обнаружена. Среди достоинств следует отметить малую протяженность ОВ, необходимую для НСД, более стабильные характеристики получаемого оптического излучения. Наиболее перспективным является НСД через устройство, создающее макроизгиб ОВ, что связано с достаточной изученностью влияния изгиба ОВ на оптическое излучение, проходящее по ОВ, возможностью контроля величины вносимого затухания, наличие в оптическом кабеле и оптических муфтах запаса ОВ, что делает возможным подключения устройства НСД практически в любом месте ВОЛС. В связи с тем, что на рынке представлено коммерческое оборудование, работа которого построена на создании макроизгиба ОВ, и которое может быть использовано для НСД, в настоящей работе акцент был сделан на обнаружение в оптических сетях доступа устройств НСД, создающих макроизгиб ОВ.

Влияние величины радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания оптического излучения с длиной волны $\lambda=1.31$ мкм и $\lambda=1.55$ мкм показано на рисунке 1:

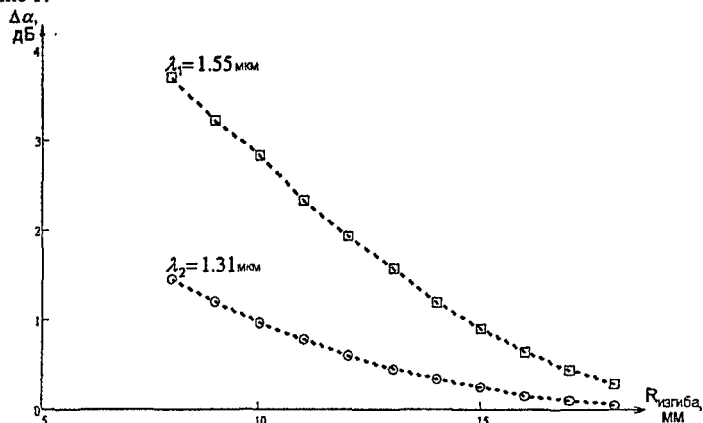


Рис.1 Влияние величины радиуса изгиба ОВ на величину прироста затухания оптического излучения

Исследование влияния величины радиуса изгиба ОВ на величины прироста затухания двух оптических излучений с разными длинами волн показало, что:

$$\frac{\Delta\alpha_{1.55}(R_{\text{изгиба}})}{\Delta\alpha_{1.31}(R_{\text{изгиба}})} > 2, \quad (2)$$

где: $\Delta\alpha_{1.55}(R_{\text{изгиба}}), \Delta\alpha_{1.31}(R_{\text{изгиба}})$ - величина прироста затухания оптического излучения при некотором радиусе изгиба ОВ, [дБ]; $R_{\text{изгиба}}$ - радиус изгиба ОВ, [мм].

При некоторых радиусах изгиба ОВ прирост затухания оптического излучения с большей длиной волны может более чем в 2 раза превышать прирост затухания оптического излучения с меньшей длиной волны. Зарубежными исследователями было получено аналитическое выражение зависимости $\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}})$. Недостатком полученного выражения является величина относительной погрешности, которая при некоторых радиусах изгиба может достигать 15%.

Таким образом, в первой главе был проведен анализ методов получения оптического излучения с поверхности ОВ, в результате которого было установлено, что лучшими характеристиками обладает НСД с использованием устройства, создающего макроизгиб ОВ. Наличие в оптическом кабеле запаса ОВ, технических средств, использующих для работы макроизгиб ОВ, предопределило необходимость исследования возможности обнаружения макроизгибов в ОСД с помощью уже имеющихся методов и средств.

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 ОСД для передачи сигнала от ОЛО до нескольких ОСБ используется оптический кабель и несколько оптических разветвителей, которые с заданным отношением распределяют входящий оптический сигнал по нескольким направлениям. В ОСБ могут быть ветви, по которым распространяется оптическое излучение, уровень мощности которого превосходит значение, необходимое для нормальной работы ОСБ:

$$\Delta P_{\text{избыт}} = \max(\alpha_{\text{сумм}-i}) - \min(\alpha_{\text{сумм}-j}), \quad (3)$$

где: $\max(\alpha_{\text{сумм}-i})$ - максимальная величина суммарного затухания оптического излучения в i -й ветви ОСД, [дБ]; $\min(\alpha_{\text{сумм}-j})$ - минимальная величина суммарного затухания оптического излучения в j -й ветви ОСД, [дБ]; $\Delta P_{\text{избыт}}$ - уровень мощности избыточного оптического излучения, [дБ].

Наличие в ОСД ветвей с избыточным уровнем мощности повышает вероятность успешного НСД.

Большинство современных систем мониторинга ВОЛС построены на базе оптического рефлектометра, реже в системах мониторинга используют измерители средней мощности оптического излучения. Проведенные исследования выявили следующие недостатки применения систем мониторинга на базе оптического рефлектометра в ОСД:

1) длительное время получения рефлектограммы, занимает от десятка секунд до нескольких минут, в течение которого отсутствует информация о состоянии ВОЛС;

2) сложность анализа рефлектограммы за счет большего числа элементов сети, точек отражения, участков затухания зондирующего сигнала;

3) отсутствие точной информации о ветви или участке возникновения неоднородности в ОВ, когда неоднородность появляется в одном из участков, расположенных за оптическим разветвителем.

Это связано с тем, точка на рефлектограмме представляет собой алгебраическую сумму отраженного зондирующего сигнала с нескольких участков ОСД:

$$P_r(l) = \sum_{z=1}^Z (P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l}{5}}) \cdot \alpha_r \cdot G \cdot \Delta l \cdot \alpha_{разв.ОР} \cdot \alpha_{разв-z}, \quad (4)$$

где: $P_r(l)$ - мощность отраженного сигнала на входе оптического рефлектометра, [мВт]; P_0 - мощность зондирующего сигнала на входе в ОВ [мВт]; Δl - длина участка рассеяния зондирующего сигнала, [км]; l - расстояние до исследуемой точки ОВ, [км]; G - фактор обратного рассеяния; α_r - коэффициент рэлеевского рассеяния; $\alpha_{разв.ОР}$ - коэффициент затухания, вносимый оптическим разветвителем оптического рефлектометра; $\alpha_{разв-z}$ - коэффициент затухания, вносимый оптическим разветвителем в ветви z ; Z - число ветвей ОСД, длина которых от ОЛЮ меньше или равна l .

Достоинства применения систем мониторинга ВОЛС на базе оптического рефлектометра в ОСД заключаются в следующем:

1) возможность обнаружения макроизгибов в ОВ, когда используются два зондирующих сигнала с разными длинами волн;

2) возможность получения информации о расстоянии до неоднородности или макроизгиба ОВ.

Исследование систем мониторинга ВОЛС с анализом уровня мощности контрольного сигнала на входе ОСБ в ОСД выявило следующие недостатки:

1) отсутствует информация о месте возникновения причины, вызвавшей рост затухания оптического излучения;

2) отсутствует информация о причинах, вызвавших рост затухания оптического излучения.

Достоинства применения систем мониторинга ВОЛС с анализом уровня мощности контрольного сигнала на входе ОСБ:

1) непрерывное или периодическое измерение затухания оптического излучения;

2) возможность осуществлять мониторинг любой ветви ОСД.

3) определение причины увеличения затухания в ОВ по величинам прироста затухания двух оптических излучений с разными длинами волн.

На рисунке 2 приведена структурная схема системы обнаружения НСД. Система обнаружения НСД состоит из трех основных блоков:

1) подсистемы мониторинга состояния ВОЛС;

2) подсистемы анализа изменений характеристик ВОЛС;

3) подсистемы 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 длиной 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 макронизгиба ОВ.

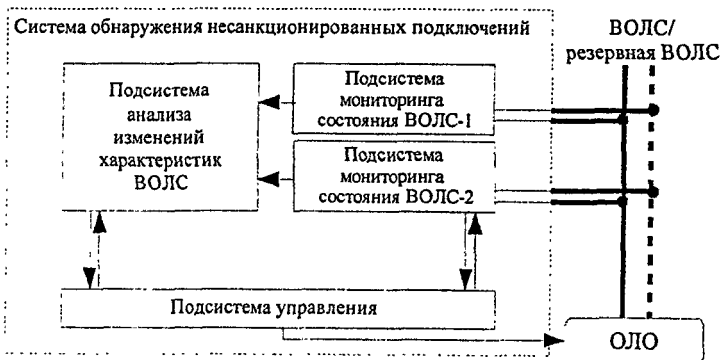


Рис.2 Структурная схема системы обнаружения НСД

Подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС осуществляет обработку данных поступающих от подсистемы мониторинга состояния ВОЛС-1. В том случае, если величина прироста затухания одного или двух контрольных сигналов отлична от нуля, подсистема анализа изменений характеристик ВОЛС обрабатывает полученные данные для того, чтобы вынести решение о причинах вызвавших изменение характеристики. Подсистема управления служит для синхронизации и управления работой подсистем мониторинга состояния ВОЛС-1, ВОЛС-2 и подсистемы анализа изменений характеристик ВОЛС. На рисунке 2 также показано, что система обнаружения может работать не по одному ОВ, а параллельно по двух оптическим волокнам. Второе ОВ, которое на рисунке 2 обозначено резервной ВОЛС, может быть использовано системой обнаружения НСД для выявления случаев, связанных с внешним воздействием оптический кабель и др. Для оперативного установления фактов роста затухания оптического излучения в ОВ была разработана методика, алгоритм которой представлен на рисунке 3.

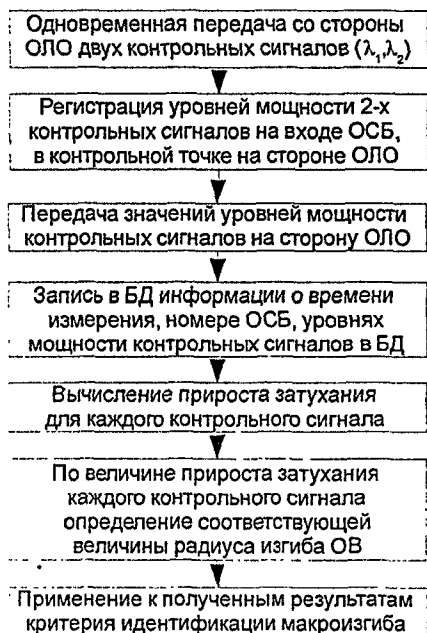


Рис.3 Алгоритм мониторинга затухания и обнаружения макроизгибов в ОСД

Со стороны ОЛО непрерывно или через интервалы времени Δt осуществляется одновременная передача контрольных сигналов на длинах волн λ_1 и λ_2 . На входе ОСБ и в контрольной точке на стороне ОЛО измеряют уровень мощности каждого контрольного сигнала. Значения уровней мощности контрольных сигналов передаются на сторону ОЛО. Результаты измерения заносятся в БД, после чего вычисляется величина прироста затухания каждого контрольного сигнала. Если $\Delta t \rightarrow 0$, можно говорить о непрерывном мониторинге величины затухания контрольных сигналов в ОВ.

На рисунке 4 представлена разработанная автором система обнаружения макроизгибов и НСД для ОСД.

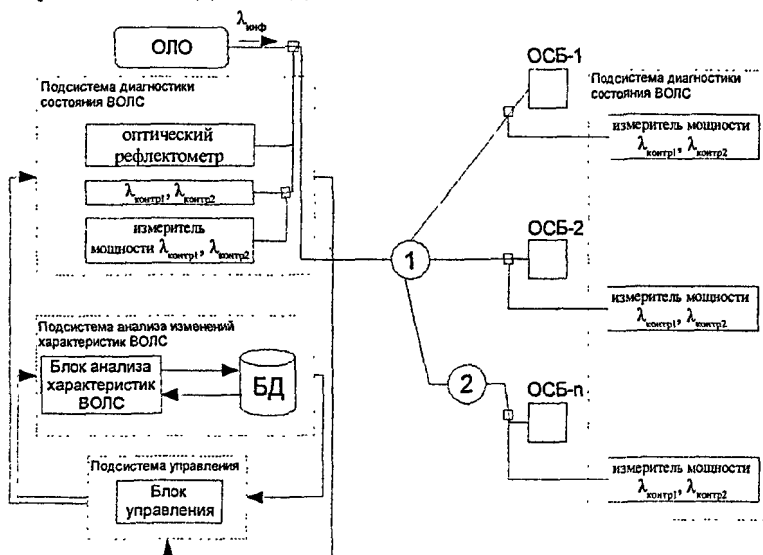


Рис.4 Архитектура системы обнаружения НСД для ОСД

На любом участке ОСД в момент времени t возможно появление неоднородности, а также возможен НСД. Для оперативного обнаружения неоднородностей и НСД необходимо на входе каждого ОСБ отслеживать изменение уровней мощности 2-х контрольных сигналов, передающихся со стороны ОЛО. Со стороны ОЛО непрерывно или через заданные интервалы времени осуществляется одновременная передача двух контрольных сигналов. На входе каждого ОСБ измеряют уровень мощности каждого контрольного сигнала, после чего эта информация передается на сторону ОЛО, где записывается в БД.

Программа анализа данных осуществляет обработку уровней мощности контрольных сигналов, полученных от каждого ОСБ. В случае выявления в i -й ветви ОСД увеличение затухания одного или двух контрольных сигналов, подсистемой анализа изменений характеристик ВОЛС устанавливается причина, вызвавшая рост затухания. В том случае, если рост затухания вызван макроизгибом ОВ, программой анализа изменений характеристик ВОЛС проводится дополнительный анализ данных с целью выявления факта НСД. В случае установления, что причиной макроизгиба является НСД, система обнаружения НСД выполняет одно из ранее установленных действий.

Таким образом, во второй главе была разработана методика мониторинга затухания в ОСД, система обнаружения макроизгибов и НСД в ОСД, которая позволяет в реальном времени отслеживать и сохранять в БД значения уровней мощности контрольных сигналов от каждого ОСБ. Использование в системе обнаружения макроизгибов и НСД оптического рефлектометра позволяет, используя результаты измерений, хранящихся в БД, устанавливать точное местоположение неоднородности. В ОСД возможны различные причины изменения уровней мощности на входе ОСБ, в связи с чем возникает задача получения критерия, с помощью которого из возможных причин увеличения затухания контрольных сигналов можно выделить причины, связанные с макроизгибом ОВ. По причине того, что в ОСД макроизгиб ОВ может появиться по такой причине, как неправильные действия обслуживающего персонала, для уменьшения числа ложных срабатываний системы обнаружения НСД необходимо получить критерии НСД за счет макроизгиба ОВ.

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. Прирост затухания в i -й ветви ОСД определяется как разность между текущим значением затухания в ОВ i -й ветви и ожидаемым значением величины затухания в ОВ i -й ветви:

$$\Delta\alpha_i = \alpha_{\text{текущее}-i} - \alpha_{\text{ожидаемое}-i} \quad (5)$$

где: $\Delta\alpha_i$ – прирост затухания в ОВ в i -й ветви ОСД, [дБ]; $\alpha_{\text{текущее}-i}$ – текущая величина затухания в i -й ветви, [дБ]; $\alpha_{\text{ожидаемое}-i}$ – ожидаемое значение затухания в i -й ветви при отсутствии дополнительных источников прироста затухания в ОВ, [дБ].

Погрешность измерения может быть уменьшена за счет проведения серий измерений за малый промежуток времени, а также за счет измерения уровней мощности контрольных сигналов на стороне ОЛО, где можно минимизировать влияние внешних факторов, что позволяет повысить точность получаемых

результатов. Величина прироста затухания является функцией радиуса изгиба ОВ и длины волны оптического излучения:

$$\Delta\alpha = f(R_{\text{изгиба}}, \lambda), \quad (6)$$

где $R_{\text{изгиба}}$ – радиус изгиба ОВ, [мм]; λ – длина волны оптического излучения, [мкм].

Предположим, что для заданного типа оптического волокна известны следующие аналитические зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda_1), \quad \text{при } \lambda_1 \\ \Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda_2), \quad \text{при } \lambda_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\lg(\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda_1))}{\lg(\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda_2))}$$

Используя (7), для оптического излучения с длиной волны λ_1 и λ_2 можно получить соответствующую величину прироста затухания, подставив в (7) значение R. Также можно провести обратную операцию, когда по величине прироста затухания одного или двух оптических излучений получается соответствующая величина R.

В том случае, если на входе ОСБ i-й ветви ОСД для оптического излучения с длиной волны λ_1 и λ_2 наблюдается прирост затухания, решение о том, является ли прирост затухания следствием макроизгиба ОВ, будет вынесено на основании следующего критерия:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{\text{изгиба}}(\Delta\alpha_{\lambda_1}) = R_{\text{изгиба}}(\Delta\alpha_{\lambda_2}) = R_{\text{изгиба}}\left(\frac{\lg(\Delta\alpha_{\lambda_1})}{\lg(\Delta\alpha_{\lambda_2})}\right), \quad \text{макроизгиб ОВ} \\ R_{\text{изгиба}}(\Delta\alpha_{\lambda_1}) \neq R_{\text{изгиба}}(\Delta\alpha_{\lambda_2}) \neq R_{\text{изгиба}}\left(\frac{\lg(\Delta\alpha_{\lambda_1})}{\lg(\Delta\alpha_{\lambda_2})}\right), \quad \text{не макроизгиб ОВ} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

В пассивных ОСД возможны случаи появления макроизгибов вследствие причин, не связанных с НСД

- 1) внешнее воздействие окружающей среды;
- 2) неправильные действия в узлах ОСД обслуживающего персонала.

В том случае, если каждый регистрируемый факт появления макроизгиба будет интерпретироваться как НСД, это приведет к росту числа ошибочных срабатываний системы обнаружения НСД. Для уменьшения числа ложных

срабатываний системы обнаружения были получены критерии, с помощью которых можно установить факт НСД:

- время возникновения макроизгиба не соответствует времени проведения регламентных или восстановительных работ на соответствующем участке ОСД;
- макроизгиб возник на участке, где не проводились регламентные или восстановительные работы;
- в том случае, если на участке возникновения макроизгиба не проводятся регламентные или восстановительные работы, а величина прироста затухания вследствие макроизгиба динамически меняется с течением времени.

Для получения расстояния до макроизгиба или другой неоднородности используется оптический рефлектометр. Информацию о новых неоднородностях получают путем сравнения текущей рефлектограммы ОСД с эталонной. Использование результатов измерения уровней мощности контрольных сигналов, хранящихся в БД, совместно с рефлектограммой позволяет однозначно установить ветвь ОСД и расстояние до неоднородности. Одной из причин появления макроизгиба ОВ может быть замерзающая в соединительной муфте вода. В том случае, если в летнее время в оптической муфте наблюдается рост затухания и в этот же момент времени обслуживающим персоналом на данном участке не проводится каких-либо работ, система обнаружения НСД сообщит о факте НСД.

Методика обнаружения несанкционированных подключений состоит в следующем. На первом этапе осуществляется считывание из БД информации о ветви и времени возникновения макроизгиба. На следующем этапе время возникновения макроизгиба в ОВ проверяется на принадлежность временным интервалам, когда макроизгиб ОВ мог возникнуть вследствие естественных причин. В том случае, если время возникновения макроизгиба не попадает ни в один из интервалов, выносится решение о факте НСД. В том случае, если время появления макроизгибов попадает в один из допустимых интервалов времени, то на следующем этапе осуществляется получение рефлектограммы ОСД. После получения рефлектограммы устанавливается ветвь ОСД, в которой появился макроизгиб ОВ. В том случае, если ветвь ОСД и расстояние до места проведения работ совпадает с ветвью ОСД и местом возникновения макроизгиба, выносится решение о естественных причинах макроизгиба. В случае невыполнения этого условия выносится решение о НСД.

На рисунке 5 представлен алгоритм, иллюстрирующий методику идентификации НСД.

Таким образом, в третьей главе был получен критерий, позволяющий идентифицировать макроизгиб ОВ среди прочих причин, вызывающих

увеличение затухания оптических сигналов. В ОСД возможны естественные причины появления макроизгибов, которые были проанализированы, на основании результатов анализа были получены критерии, методика и алгоритм идентификации НСД. Макроизгиб может быть обнаружен по величинам прироста затухания двух контрольных сигналов. К настоящему времени зарубежными исследователями получено аналитическое выражение зависимости величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ.

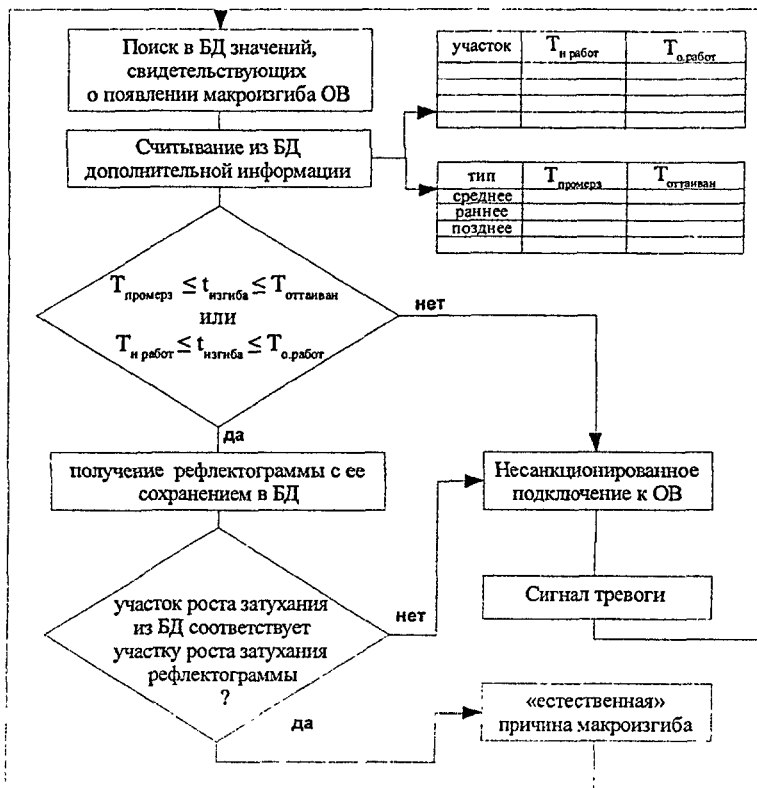


Рис.5 Алгоритм обнаружения несанкционированных подключений к ОВ

Недостаток имеющегося аналитического выражения связан со значительной величиной относительной погрешности, которая при некоторых радиусах изгиба может достигать 15% и не позволяет использовать полученный критерий для идентификации макроизгиба ОВ. В связи с этим была поставлена задача получения с помощью экспериментальных данных зависимости $\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda)$ с величиной относительной погрешности во всех точках исследуемого интервала $[R_{\text{изгиба-min}}; R_{\text{изгиба-max}}]$ меньше 1%.

В четвертой главе проведено исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину относительной погрешности в узлах аппроксимации и точках, лежащих между узлами аппроксимации, в результате которого был установлен вид аппроксимирующей функции, удовлетворяющий заданному критерию, получено аналитическое выражение $\Delta\alpha(R_{\text{изгиба}}, \lambda)$ с величиной относительной погрешности во всех точках исследуемого интервала $[R_{\text{изгиба-min}}; R_{\text{изгиба-max}}]$ меньше 1%.

Выбор аппроксимирующей функции, осуществлялся на основании следующего критерия:

$$100\% - \frac{|\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda) - \Delta\alpha_{\text{аппроксим}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda)| \cdot 100\%}{\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda)} \rightarrow 0, \quad (9)$$

где $R_{\text{изгиба}}$ - радиус изгиба ОВ, [мм]; λ - длина волны оптического излучения, [мкм]; $\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda)$ - величина прироста затухания оптического излучения, полученная из эксперимента, [дБ]; $\Delta\alpha_{\text{аппроксим}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda)$ - величина прироста затухания оптического излучения, полученная из аппроксимирующей функции, [дБ].

Перед выбором аппроксимирующей функции был проведен предварительный анализ экспериментальных данных, направленный на определение вида исследуемой зависимости и возможность аппроксимации экспериментальных данных функциями, вид которых близок к исследуемой зависимости. Было установлено, что ни одна из известных простых функций не удовлетворяет критерию (9), на основании чего было сделано заключение, что зависимость величины прироста затухания оптического излучения от радиуса изгиба ОВ является сложной функцией.

Дальнейшее исследование влияния выбора аппроксимирующей функции на величину относительной погрешности во всех точках исследуемого интервала $[R_{\text{изгиба-min}}; R_{\text{изгиба-max}}]$ проводилось на математической модели $\Delta\alpha_{\text{модель}}(R_{\text{изгиба}}, \lambda)$. В качестве модели была выбрана функция, характер изменения которой на

интервале $[R_{\text{изгиба-min}}; R_{\text{изгиба-max}}]$ был близок к исследуемому процессу, и которая представляла собой линейную комбинацию простых функций вида:

$$\Delta\alpha_{\text{общ.модель}}(R_{\text{изгиба}}) = a_1 \cdot f_1(R_{\text{изгиба}}) + a_2 \cdot f_2(R_{\text{изгиба}}) + \dots + a_n \cdot f_n(R_{\text{изгиба}}) \quad (10)$$

Приближение общего вида математической модели к результатам эксперимента было выполнено на основании следующего условия:

$$\Delta\alpha_{\text{модель}}(R_{\text{изгиба}}) = \sum_i [\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}-i}) - \Delta\alpha_{\text{общ.модель}}(R_{\text{изгиба}-i})]^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $R_{\text{изгиба}-i}$ - i -ое значение величины радиуса изгиба ОВ на интервале $[R_{\text{изгиба-min}}; R_{\text{изгиба-max}}]$, [мм]; $\Delta\alpha_{\text{экс}}(R_{\text{изгиба}-i})$ - величина прироста затухания оптического излучения при i -ом значении величины радиуса изгиба ОВ, полученное из эксперимента, [дБ]; $\Delta\alpha_{\text{общ.модель}}(R_{\text{изгиба}})$ - величина прироста затухания при i -ом значении величины радиуса изгиба ОВ, полученная из математической модели, [дБ].

В ходе исследования было получено несколько выражений вида (10), отличающихся друг от друга комбинацией функций $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$. После подстановки (10) в (11) было получено несколько математических моделей, с помощью которых проводилась оценка погрешности различных аппроксимирующих функций, как в узлах аппроксимации, так и в точках, лежащих между узлами аппроксимации. В аналитическое выражение вида (10), приближенное к результатам эксперимента с помощью (11) и представляющее собой математическую модель исследуемого физического процесса, подставлялись значения аргумента аналогичные тем, что использовались в реальном эксперименте: $[R_0; R_1; R_2; \dots; R_n]$. В результате была получена таблично заданная функция: $(R_0; \Delta\alpha(R_0)); (R_1; \Delta\alpha(R_1)); (R_2; \Delta\alpha(R_2)); \dots; (R_n; \Delta\alpha(R_n))$ близкая по значениям функции к результатам эксперимента. На следующем шаге полученная таблично заданная функция аппроксимировалась несколькими аппроксимирующими функциями так и из тех же соображений, как будто ее аналитическое выражение было не известно. В итоге было получено несколько аппроксимирующих функций. Зная истинный вид аналитического выражения, из которого была получена таблично заданная функция, а также аналитическое выражение, полученное в результате аппроксимации таблично заданной функции, на всем исследуемом интервале $[R_0; R_n]$ была выполнена оценка погрешности в узлах и между узлами аппроксимации. В результате проведенного исследования было установлено, что для всех полученных моделей лучшей по критерию минимальной величины относительной погрешности во всех точках исследуемого

интервала $[R_{\text{изгиб-мин}}; R_{\text{изгиб-макс}}]$ является выбор в качестве аппроксимирующей функции кубического сплайна.

Итоговое аналитическое выражение имеет вид:

$$\Delta\alpha(R_{\text{изгиб}}) = \begin{cases} a_{01} + b_{01}(R_{\text{изгиб}} - R_0) + c_{01}(R_{\text{изгиб}} - R_0)^2 + \\ + d_{01}(R_{\text{изгиб}} - R_0)^3, & R_0 \leq R_{\text{изгиб}} \leq R_1 \\ a_{12} + b_{12}(R_{\text{изгиб}} - R_1) + c_{12}(R_{\text{изгиб}} - R_1)^2 + \\ + d_{12}(R_{\text{изгиб}} - R_1)^3, & R_1 \leq R_{\text{изгиб}} \leq R_2 \\ \dots\dots\dots \\ a_{n-1n} + b_{n-1n}(R_{\text{изгиб}} - R_{n-1}) + c_{n-1n}(R_{\text{изгиб}} - R_{n-1})^2 + \\ + d_{n-1n}(R_{\text{изгиб}} - R_{n-1})^3, & R_{n-1} \leq R_{\text{изгиб}} \leq R_n \end{cases}, \quad (12)$$

где: $[R_0; R_1; R_2; \dots; R_n]$ – величины радиусов радиусы изгиба ОВ, [мм]; n – число точек, полученных в эксперименте; $a_{01}, b_{01}, c_{01}, d_{01}$ – коэффициенты кубической функции на интервале между точками $[R_0; R_1]$, получаемые из требований, предъявляемых кубическим сплайном к функции на интервале $[R_0; R_1]$, [дБ], [дБ/мм], [дБ/мм²], [дБ/мм³]; $a_{n-1n}, b_{n-1n}, c_{n-1n}, d_{n-1n}$ – коэффициенты кубической функции на интервале между точками $[R_{n-1}; R_n]$, получаемые из требований, предъявляемых кубическим сплайном к функции на интервале $[R_{n-1}; R_n]$, [дБ], [дБ/мм], [дБ/мм²], [дБ/мм³].

Аппроксимация экспериментальных данных кубическим сплайном дает меньшую величину относительной погрешности на интервале $[R_{\text{изгиб-мин}}; R_{\text{изгиб-макс}}]$, чем аппроксимация тех же экспериментальных данных линейным и квадратичным сплайном, что показано на рисунке 6. При этом максимальная величина относительной погрешности на всем исследуемом интервале была меньше 1%, а в узлах аппроксимации равнялась нулю.

Таким образом, в четвертой главе было получено аналитическое выражение зависимости величины прироста затухания оптического излучения от величины радиуса изгиба ОВ путем аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном. После аппроксимации экспериментальных данных кубическим сплайном было получено аналитическое выражение, максимальная величина относительной погрешности которого во всех точках исследуемого интервала была меньше 1%.

В том случае, если в ОВ создан макронизгиб с радиусом изгиба отличным от того, что был получен в эксперименте, подстановка полученной величины

прироста затухания оптического излучения в аналитическое выражение даст величину радиуса изгиба ОВ, отличающуюся от истинного значения. Это будет справедливо для оптических излучений на разных длинах волн, и приведет к невыполнению условия (8). Зная максимальную величину относительной погрешности для каждого оптического излучения, и учитывая ее в (8), можно добиться вынесения правильного решения о том, что причиной роста затухания двух оптических излучений является изгиб ОВ, а малая величина погрешности позволяет свести к минимуму число причин, имеющих схожее влияние на контрольные сигналы.

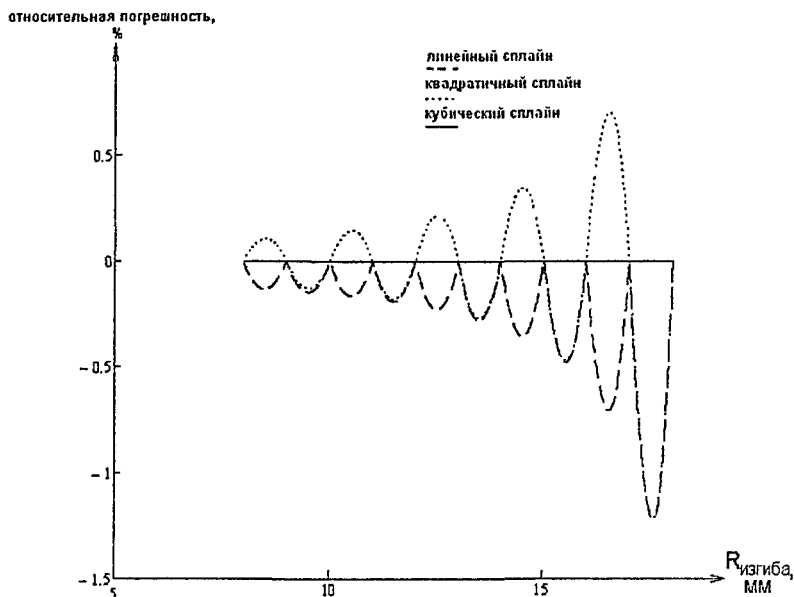


Рис.6 Зависимость величины погрешности аппроксимации от значения радиуса изгиба ОВ для разных аппроксимирующих функций

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 через макроизгиб 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 функции, 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 проводится мониторинг каждой ветви ОСД с целью выявления макроизгибов и фактов НСД через макроизгиб ОВ.

Список публикаций по теме диссертации

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 PON // 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 PON // Технологии информационного общества: Тезисы докладов

- московской отраслевой научно-технической конференции. – М.: Инсвязьиздат, 2007. – 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 конференции. – Нижний Новгород: 2007. – С. 22-25.
 7. Булавкин И.А. Обнаружение несанкционированных воздействий в сетях PON //XV Межрегиональная научно-техническая конференция «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения»: Труды конференции. – Нижний Новгород: 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.: Инсвязьиздат, 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.: «Медиа Паблишер», 2008. – С. 426.
 - 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 PON без использования рефлектометра // Вестник связи. – 2008. – №3. – С. 54-58.

Подписано в печать 06.11.08. Формат 60х84/16. Объем 1,5 усл.п.л.
Тираж 100 экз. Заказ 145.

ООО «Инсвязиздат». Москва, ул. Авиамоторная, 8.