

**Б.К. НИКИТИН
Л.Н. КОЧАНОВСКИЙ**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2010**

УДК 621.391.63.029.7 (075.8)

ББК 3889я73

Н 62

Рецензенты:

главный специалист СЛКС ОЭПС ОАО «Ростелеком», СЗФ Е.Б. Стогов,
директор НОУ «Лентелефонстрой–УВЦ»
ОАО «Лентелефонстрой Т.И. Васильева

Н 62 Никитин, Б. К.

Совершенные технологии проектирования, строительства и эксплуатации направляющих систем электросвязи: учеб. пособие / Б.К. Никитин, Л.Н. Кочановский; ГОУВПО СПбГУТ. – СПб, 2010. – 192 с.
ISBN 978-5-89160-064-5

Рассматриваются вопросы технологического проектирования, реконструкции участков первичной сети как с сохранением существующих кабелей, так и строительством ВОЛС – подземных, воздушных, на «последней миле», для обеспечения потребностей передачи информации в мультисервисных сетях. Приводится построение системы ТЭ после реконструкции–мониторинга ВОЛС, проведение РВР на основе временных волоконно-оптических кабельных вставок.

УДК 621.391.63.029.7 (075.8)

ББК 3889я73

ISBN 978-5-89160-064-5 Б.К. Никитин, Л.Н. Кочановский, 2010
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 2010

ВВЕДЕНИЕ

В наше время сплошной информатизации, телефонизации, построения мультисервисных сетей широкополосного доступа, объемы и качество строительства волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) характеризуют степень развития страны, определяют предпосылки ее экономического развития. Оценка с этих позиций состояния строительства ВОЛС в России представляется достаточно интересной задачей. Такая оценка позволяет определить перспективные направления развития строительного комплекса отрасли «Связь».

Россия позже ведущих индустриальных стран мира начала проектирование и строительство сетей связи на основе волоконно-оптических кабелей. Затянувшийся в конце 80-х годов прошлого столетия процесс освоения отечественным производством оптических кабелей связи окончился полным развалом межотраслевого научно-технического комплекса «Световод», который пытался организовать промышленный выпуск как самих оптических кабелей, так и всех компонент для них, прежде всего оптических заготовок и волокон. Но в кабельной промышленности остались научно-технические коллективы, сумевшие в начале 90-х годов освоить отечественное производство оптических кабелей.

Из-за отсутствия промышленного производства оптических кабелей в 80-х годах Минсвязи СССР не смогло развернуть в стране строительство ВОЛС. Лишь только в конце 80-х было осуществлено строительство первых волоконно-оптических линий связи на нескольких объектах, среди которых следует отметить ВОЛС «Ленинград–Сосновый Бор» и «Ленинград–Минск». Опыт строительства, накопленный на этих объектах, позволил в начале и середине 90-х годов обеспечить успех строительства волоконно-оптической сети ОАО «Ростелеком», а также в короткие сроки расширить зоны строительства ВОЛС на все виды телекоммуникационных сетей связи страны.

Строительство ВОЛС в России началось в условиях функционирования взаимоувязанной сети связи (ВСС), практически полностью работающей как аналоговая сеть. Поэтому строительство ВОЛС требовало установки нового цифрового оборудования связи. Конечно, затраты на такое комплексное строительство становились значительно большими, но и выгоды – очевидными: целиком создавалась цифровая сеть на основе новейших технических решений. Отмена в отношении России ограничений КОКОМ в 1993 году открыла российским операторам доступ к западному рынку продажи любого оборудования связи, а также к новейшим технологиям строительства ВОЛС.

На всех объектах электросвязи строительство ВОЛС имело и имеет подъемы и спады, успехи и неудачи, а также присущие только России национальные особенности, которые, порой, играют определяющую роль в формировании предпосылок развития сетей связи страны.

Рассмотрим некоторые наиболее весомые из этих особенностей на основных направлениях строительства ВОЛС [1].

Огромные пространства России и необходимость на первом этапе соединить отдаленные регионы с центром страны обусловили первую национальную особенность строительства сетей связи – строительство в начальный период не местных, как в большинстве стран, а магистральных междугородных ВОЛС. К этому надо добавить, что после распада СССР в 1991 году Россия осталась в международной телекоммуникационной изоляции. Надо было срочно выходить из нее, т. е. к числу первоочередных задач была отнесена задача строительства международных ВОЛС для выхода в мировое телекоммуникационное пространство.

Новый оператор международной и междугородной связи России АО «Совтелеком» (в дальнейшем ОАО «Ростелеком») принял верное решение: начал строительство с самой трудной и сложной составляющей ВСС – международной подводной ВОЛС. Взяв иностранный кредит, АО «Совтелеком» совместно с датскими компаниями «GN» и «Телеком Денмарк» построил первую в России международную подводную ВОЛС «Дания–Россия», соединившую Санкт-Петербург с датским городом Аберслунд, т. е. было «прурублено» телекоммуникационное окно в Европу.

Об эффективности данного решения можно судить по следующим последствиям:

- * при строительстве этой ВОЛС, благодаря ее международному характеру, были использованы самые современные для того времени технологии строительства и технические средства связи;

- * окупаемость ВОЛС оказалась настолько быстрой, что при дальнейшем строительстве ВОЛС стали приниматься смелые проекты большой стоимости;

- * для нового строительства ВОЛС в России был создан образец очень высокого технического уровня, что определило в дальнейшем высокое качество и новизну технологических решений для междугородных ВОЛС.

Наибольших объемов строительство ВОЛС в России достигло в 1997–1998 годах: в эти годы только на объектах ОАО «Ростелеком» строилось до 8 тыс. км ВОЛС в год. Чуть позднее большое строительство ВОЛС на ведом-

ственной сети МПС развернуло ЗАО «Транстелеком». В эти же годы окрепшие региональные компании электросвязи начали перестраивать на основе ВОЛС зоновые сети связи. Все преимущества ВОЛС нашли воплощение на городских сетях сначала Москвы и Санкт-Петербурга, а затем других городов России. Местные волоконно-оптические сети стали строиться новыми операторами, нацеленными на внедрение новых услуг связи.

Развитие новой рыночной экономики в России началось с Москвы. Москва развивается гораздо быстрее регионов России. В государственных интересах связать Москву со всеми регионами мощными телекоммуникационными линиями, чтобы стимулировать их развитие.

Именно эту государственную задачу в кратчайшие сроки решило ОАО «Ростелеком», построив за 9 лет сеть междугородных ВОЛС протяженностью более 40 тыс. км.

Огромные объемы строительства, реализованные в 90-х годах ОАО «Ростелеком», могли быть выполнены только крупнейшими строительными компаниями, поэтому были привлечены к строительству ВОЛС самые сильные строительные компании электросвязи такие, как ОАО «Межгорсвязьстрой», ОАО «Лентелефонстрой», ОАО «Связьстрой-1», ОАО «Связьстрой-5», ОАО «Связьстрой-6» и другие. Освободившись от государственного регулирования, эти компании, возглавляемые руководителями новой формации, сумели освоить новейшие технологии строительства и довести качество строительства до мировых стандартов.

Интенсивное строительство магистральных, междугородных ВОЛС в России в начале и в середине 90-х годов прошлого столетия явилось тем звеном, которое стало вытягивать на новый уровень развития смежные отрасли народного хозяйства. Например, в короткие сроки была решена проблема организации и освоения выпуска отечественных оптических кабелей связи на уровне лучших мировых образцов. Было организовано производство всех технических средств для строительства кабельных магистралей, включая такие новейшие средства, как защитные полиэтиленовые трубы для задувки оптических кабелей. Совместно с японской компанией NEC в городе Черноголовка было организовано производство современной аппаратуры волоконно-оптических систем передачи. Только в производственной сфере вокруг строительства магистральных ВОЛС работают несколько десятков тысяч человек.

Быстрое строительство магистральной сети связи подтолкнуло региональные компании электросвязи к строительству региональных (зоновых)

волоконно-оптических сетей связи. Для строительства ВОЛС на зоновой сети стали привлекаться строительные компании, уже имеющие большой опыт строительства магистральных линий. Эти компании принесли высокий технологический уровень строительства и на зоновые сети. Региональные строительные компании по строительству сооружений связи быстро подтягивались до технического уровня крупных компаний – к этому подталкивала жесткая конкурентная борьба.

Одновременно получили мощное развитие городские и местные коммерческие компании электросвязи, которые, используя факт наличия междугородных и международных ВОЛС в России, быстро подтянули к сетям клиентов-потребителей, не преминувшие этими возможностями воспользоваться. Таким образом, наряду с крупными операторами связи стали быстро развиваться средние и мелкие операторы. Сильное звено ОАО «Ростелеком» вытягивало эти компании на современный уровень работы с потребителями.

В России исторически сложилось так, что из-за слабо разветвленной сети связи общего пользования многие ведомства вынуждены были строить свои сети. В ряде случаев такое строительство обусловлено технологическими особенностями производств конкретных ведомств, например, необходимостью обеспечения технологической связи вдоль нефте- и газопроводов, связи вдоль железных дорог, желанием создать закрытые сети связи некоторыми государственными структурами.

Перевод ведомственных сетей на волоконно-оптические является дорогостоящим мероприятием. Как правило, для окупаемости такого строительства кроме технологической составляющей закладывается и так называемая коммерческая составляющая, т. е. значительная часть мощности ведомственной сети предполагается для использования в коммерческой связи для обслуживания населения и определенных клиентов связи.

Первой ведомственной сетью, которая реализовала этот подход, стала сеть ЗАО «Транстелеком». В планах этого ЗАО – создание второго после ОАО «Ростелеком» национального оператора международной и междугородной электросвязи.

Вслед за амбициозными планами ЗАО «Транстелеком» новое строительство ВОЛС на ведомственных сетях начали ОАО «Транснефть», РАО ЕЭС, «Газпром» и другие ведомства.

Для строительства ВОЛС ведомственных сетей целесообразно использовать те же технологии, что используются на сети общего пользования России. Координацию строительства ведомственных сетей связи, ее увязку с

интересами сети общего пользования ранее осуществлял межведомственный координационный комитет при Минсвязи.

Интеграция России в мировое телекоммуникационное пространство требует избавления от тормозящих этот процесс национальных особенностей. Прежде всего, надо отказаться от государственного управления операторами междугородной и зонавой связи. Первые годы работы акционерных компаний «Ростелеком», региональных компаний электросвязи показал, что инициатива по-настоящему открытых акционерных компаний позволяет решать любые большие задачи по строительству сетей связи в кратчайшие сроки.

Необходимо создать условия для нового строительного «рывка» междугородных, зонавых и местных ВОЛС, нельзя оставаться с огромным наследием медножильных сетей в условиях динамично развивающихся технологий мультисервисных сетей. Это отставание в свою очередь является одним из препятствий развития экономики регионов России. Оставлять без широкополосного доступа к современным сетям связи большую часть населенных пунктов России – значит оставлять их на дальнейшее прозябание.

Безусловно, первоочередная задача развития мультисервисной сети связи России – построение правильных проектных решений, базирующихся на самых современных технологиях строительства и эксплуатации ВОЛС различного класса и назначения: первичные сети, сельские, внутризонавые, магистральные (междугородные и международные), трафик которых плавно преобразуется во вторичной сети в структуры, удобные для восприятия любым абонентом с любым периферийным устройством.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ

Начало всех работ по созданию участков, элементов, сегментов и их связей в общем сетевом решении предполагает наличие технического задания на разработку. Это задание является основой для всех, подчеркиваю, всех технических решений по элементам, структурам и сетевым топологиям, всех вопросов согласования и принятия решений по техническим, организационным, юридическим, коммерческим и прочим задачам, решаемым при создании новой сетевой структуры.

1.1. Структура технического задания

В общем случае техническое задание [2–4] для конкретного, небольшой протяженности участка (сегмента) сети, может выглядеть следующим образом:

Титульный лист.

Общие сведения и пожелания.

Назначение и цели создания ВОЛС.

Характеристика объектов.

Требования к проектируемой системе.

Состав и содержание работ по созданию системы.

Требования к документированию.

Протоколы согласований технического задания.

Перечень условных обозначений и сокращений:

АРМ – автоматизированное рабочее место

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВОК – волоконно-оптический кабель

ЗИП – запасное имущество и принадлежности

ЛВС – локальная вычислительная сеть

СВТ – средства вычислительной техники

СКС – структурированная кабельная система

ПУЭ – правила устройства электроустановок

КИВС – комплекс информационно-вычислительных систем

Титульный лист

(которому нужно уделять должное внимание, чтобы не обидеть конкурентов и обеспечить поддержку заказчика)

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор _____

(Организация ЗАКАЗЧИК

МПФИО.....)

«...».....20...г.

УТВЕРЖДАЮ

Президент _____

(Организация Ген. ПОДРЯДЧИК

МПФИО.....)

«...».....20...г.

Волоконно-оптическая линия связи между пунктами (1, 2, 3) с организацией N-числа первичных цифровых потоков и их распределением в соответствии со схемой организации связи.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

На ____ листах. Действует с «...».....20... г.

СОГЛАСОВАНО

Руководители технических и финансовых служб

ЗАКАЗЧИК

.....ФИО

«...».....20...г.

.....ФИО

«...».....20...г.

ГЕН. ПОДРЯДЧИК

.....ФИО

«...».....20...г.

.....ФИО

«...».....20...г.

Общие сведения

Настоящее Техническое задание описывает задачу построения волоконно-оптической линии связи в соответствии со схемой распределения цифровых потоков по заданным населенным пунктам (объектам) включает в себя: 1. -----
----- 2. ----- 3. ----- и т.д.

Шифр проекта (номер договора и дата утверждения заказчиком).

Заказчик проекта: ЗАО « _____ ».

Генеральный подрядчик: ЗАО « _____ ».

Основанием для выполнения работ по теме является договор на создание волоконно-оптической линия связи между пунктами (1, 2, 3) с организацией *N*-числа первичных цифровых потоков и их распределением в соответствии со схемой организации связи.

Сроки проведения предпроектных изыскательских работ – «...».....20...г. по «...».....20...г., но не более 3-х месяцев с момента получения средств на счет ПОДРЯДЧИКА.

Сроки проведения проектных работ – «...».....20...г. по «...».....20...г. с предоставлением рабочей документации, но не более 6-ти месяцев с момента получения средств на счет ПОДРЯДЧИКА.

Источник финансирования – (обязательно указывается фонд предприятия, из которого производится финансирование работ).

Проект оформляется в виде набора проектной документации, перечень которой утвержден согласно ГОСТ в разделе «Обоснование задачи проектирования» Технического проекта. Далее на строительство и монтаж ВОЛС заключается договор, в котором Технический проект и настоящее техническое задание, являются приложениями, согласно которым проводятся работы. По окончании строительных и монтажных работ сторонами составляется Акт сдачи-приемки, на основании которого ВОЛС вводится в эксплуатацию.

Эскизный проект, подготовленный на основании предпроектных изыскательских работ, должен предусматривать множество возможных решений, предназначенных для заданных объектов. Окончательные проектные решения должны быть согласованы с ЗАКАЗЧИКОМ.

Назначение и цели создания ВОЛС

Комплекс оборудования и ВОЛС предназначен для:

- обмена данными в сети передачи данных;
- доступа к ресурсам сети Интернет;
- обеспечения надежных каналов передачи информации в пределах сети передачи данных;
- подготовки основы для создания единого информационного пространства на территории региона;
- обеспечения систем безопасности и иных общественных сервисов на территории развертывания сети передачи данных;
- коммерческого использования полученных средств телекоммуникаций в интересах населения и предприятий региона.

Характеристика объектов

ВОЛС строится в интересах целого ряда организаций, фирм, банковских структур, а также для обеспечения населения современными услугами связи, и позволяет объединить в единую сеть передачи данных в пределах района или города в целом.

ВОЛС строится как участок первичной сети с взаимодействием с городской сетью передачи данных, телефонии и состоит из магистральной части и сетей доступа (сети жилых домов – зональных СКС).

Магистральная часть связывает между собой населенные пункты, где предполагается развертывание вторичной сети. Она строится на базе волоконно-оптических кабелей (ВОК) связи.

Способ прокладки ВОК выбирается таким образом, чтобы минимизировать ее стоимость, она строится в виде смешанной топологии звезды и дерева.

На последующих этапах магистраль предполагается достраивать до кольцевой топологии. Кольца становятся основой транспортной системы магистрального и городского уровня. Доступ абонентов в сеть производится через сети доступа – зональные СКС, а также на основе технологии PON.

Развертывание магистральной сети предполагается с использованием (воздушной подвесной линии связи (ВПЛС) на базе ВОК и каналообразующего оборудования. Особое внимание необходимо уделять обустройству подвеса, обвода, ввода кабеля в помещение и герметизации при прокладке ВОК).

Зональные СКС предполагается реализовывать на медном кабеле типа «витая пара» категории не ниже 5-й и ВОК в соответствии с технологией PON. СКС располагаются в жилых домах или учреждениях, проходят по техниче-

ским кабельным шахтам с последующим подводом в жилое или иное помещение к месту подключения абонента. Использование СКС на базе ВОК по технологии PON в местах возможного нарушения требований стандартов к качеству передаваемых сигналов (при длинах медных кабелей больше 100 м).

Предполагаемая технология среды функционирования магистральной СКС – Gigabit/10G Ethernet, EPON, GPON.

Предполагаемая технология среды функционирования зональных СКС – Ethernet/ Fast Ethernet.

Требования к проектируемой системе

Наличие стандартизированной, сертифицированной оптической среды передачи данных.

Устойчивость системы передачи данных к затуханию оптического сигнала.

Резервирование каналов передачи данных.

Выбор обустройства подвеса ВОК, обвода, ввода кабеля в помещение и герметизации при прокладке ВОК.

Возможность развития сети в рамках выбранной сетевой технологии при оптимальном соотношении цена/улучшения параметров в условиях растущего трафика и требований к качеству приложений.

Достаточности скорости передачи информации для исполнения планируемых в сети приложений.

Управляемости – для обеспечения предоставления услуг разного уровня качества и разных по величине параметров.

Надежности и возможности резервирования, гарантирующие достаточное время бесперебойной работы, а также приемлемое время восстановления в случае аварии.

Безопасности информации.

Обеспечение требуемого качества обслуживания клиентов.

Все оборудование, используемое при монтаже каналов передачи данных, прошло тест и имеет сертификат соответствия «Системы сертификации «Электросвязь» ССЭ Минсвязи РФ.

Состав проектируемой системы

Устанавливаемая кабельная система строится по иерархическому принципу с применением однотипных решений для каждого уровня иерархии.

Гарантия на СКС

Гарантийная поддержка кабельной системы монтируемой ВОЛС осуществляется в течение 25 лет с даты приема в эксплуатацию. Это подразумевает, что монтируемые каналы передачи данных сертифицируются и в течение 25 лет электрические характеристики каналов будут находиться в пределах диапазона параметров.

Состав и содержание работ по созданию системы

Настоящий состав работ используется как приложение к договору на монтаж ВОЛС, который может быть дополнен календарным планом и соответственно бюджетом этапа, с указанием сроков поставки и монтажа оборудования.

Закупка оборудования, кабельных изделий, элементов пассивной оптики.

Работы по подготовке объектов к монтажным работам.

Поставка оборудования, аппаратуры, кабельных изделий, элементов пассивной оптики, проведение входного контроля.

Работы по организации ввода кабеля в здания и размещение аппаратуры.

Работы по организации кроссовых помещений.

Работы по каблированию горизонтальной кабельной подсистемы.

Работы по каблированию магистральной кабельной подсистемы.

Монтаж подсистемы рабочих мест.

Кроссировка кабельных подсистем.

Прозвонка и маркировка.

Приемосдаточные испытания.

Оформление документации.

Требования к документированию

В ходе проведения работ по проектированию ВОЛС и объектов подготавливается Технический проект описывающий согласно техническому заданию технические условия и виды работ, содержащий исследование и обоснования, техническое задание на создание проекта рабочей документации, рабочую документацию (общее описание системы, локальная смета, технологическая инструкция, схема деления системы (структурная), чертежи установки технических средств подсистем, программа и методика испытаний).

После проведения работ перед вводом системы в эксплуатацию подготавливаются документы результатов испытания системы, данные тестов по сертификации, которые являются основанием для выдачи гарантии на систему.

Изменения к техническому заданию и рабочей документации оформляются дополнением или подписанным ЗАКАЗЧИКОМ и ПОДРЯДЧИКОМ протоколом. Дополнение или указанный протокол являются неотъемлемой частью технического задания и рабочей документации.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Протоколы согласований технического задания

Волоконно-оптическая линия связи между пунктами (1, 2, 3)
с организацией N-числа первичных цифровых потоков
и их распределением в соответствии со схемой организации связи

СОСТАВИЛИ

Наименование организации, предприятия-подрядчика (субподрядчика), поставщика	Должность исполнителя	Фамилия имя, отчество	Подпись	Дата
ООО « _____ »	Директор ИТ департамента			
ООО « _____ »	Инженер-проектировщик			
ООО « _____ »	Инженер по технике безопасности			

СОГЛАСОВАНО

Наименование организации, предприятия	Должность исполнителя	Фамилия, имя, отчество	Подпись	Дата

Заключение экспертной комиссии о необходимости и возможности строительства объекта (текст)

Обоснования для выбора генподрядчика (текст, лицензии)

Краткое содержание разделов технического задания

Общие сведения и пожелания

В разделе отмечаются наиболее общие характеристики существующей ситуации в регионе (городе, пункте, объекте), рассматриваются перспективы

развития и потребности в реализации задач по обеспечению широкополосного доступа в существующие или перспективные сети связи.

Описание приводится в совершенно произвольной форме, но с соответствующей доказательной базой, что позволит правильно оценить потребности в телекоммуникационных услугах и предварительные затраты на их реализацию.

Назначение и цели создания ВОЛС

Возможные применения ВОЛС весьма широки – от линии городской и сельской связи и бортовых комплексов (самолеты, ракеты, корабли) до систем связи на большие расстояния с высокой информационной емкостью.

На основе оптической волоконной связи могут быть созданы принципиально новые системы передачи информации. На базе ВОЛС развивается единая интегральная сеть многоцелевого назначения. Весьма перспективно применение волоконно-оптических систем в кабельном телевидении, которое обеспечивает высокое качество изображения и существенно расширяет возможности информационного обслуживания абонентов.

Многоканальные ВОСП широко используются на магистральных и зональных сетях связи страны, а также для устройства соединительных линий между городскими АТС. Объясняется это тем, что по одному ОВ может одновременно распространяться много информационных сигналов на разных длинах волн, т. е. по оптическим кабелям (ОК) можно передавать очень большой объем информации.

Основная задача определить назначение ВОЛС не в общем смысле, а конкретно, какой и сколько трафика будет по ней передаваться, какие проблемы должна решать проектируемая ВОЛС, показатели надежности и возможности резервирования по другим направляющим системам.

Характеристика объектов

В этом разделе технического задания приводятся характеристики объектов, куда должны быть направлены определенные потоки информации в соответствии со схемой организации связи.

Основные сведения об объектах:

- планы помещений и их «заполненность» существующим оборудованием;
- примерное место расположения нового оборудования, потребности в объемах, требования к кондиционированию помещений и поддержанию температурно-влажностного режима;

- определение возможности прокладки новых коммуникационных систем в структуре существующих кабельных каналов, кабель-ростов, кабельных лотков и пр.;
- размещение оборудования системы мониторинга ВОЛС и ее обеспечение техническим персоналом.

Требования к проектируемой системе

В настоящем разделе технического задания должны быть изложены основные требования к системе (участку ВОЛС, сегменту сети), которые должны быть учтены при проектировании ВОЛС того или иного уровня:

- наличие стандартизированной оптической среды передачи данных;
- устойчивость системы передачи данных к изменениям затухания оптического сигнала;
- резервирование каналов передачи данных;
- выбор общего способа прокладки магистрального ВОК, ввода кабеля в помещения и его герметизации, а также разводке внутри объектовых кабелей и схема их взаимодействия;
- оценка возможности развития сети в рамках выбранной сетевой технологии при оптимальном соотношении цена/улучшения параметров, в условиях растущего трафика и требований к качеству приложений;
- достаточности скорости передачи информации для исполнения планируемых в сети приложений;
- управляемости – для обеспечения предоставления услуг разного уровня качества и разных по величине параметров;
- надежности и возможности резервирования, гарантирующие достаточное время бесперебойной работы, а также приемлемое время восстановления в случае аварии;
- безопасности информации;
- обеспечение требуемого качества обслуживания клиентов.

Состав и содержание работ по созданию системы

Этот раздел технического задания очень важен с точки зрения планирования работ, необходимых для создания системы или ее частей. Если не предусмотреть тот или иной вид работ, это приведет к возрастанию затрат на реализацию системы.

Можно привести примерный перечень работ в укрупненном виде, однако в проектных решениях должно быть четко оговорено, какие работы и в

какие сроки будут проводиться, поскольку это может потребовать согласований с другими организациями;

- исследование рынка оборудования, кабельных изделий, элементов пассивной оптики;
- работы по подготовке объектов к монтажным работам;
- поставка оборудования, аппаратуры, кабельных изделий, элементов пассивной оптики, проведение входного контроля;
- работы по организации ввода кабеля в здания и размещение аппаратуры;
- работы по организации кроссовых помещений;
- работы по каблированию горизонтальной кабельной подсистемы;
- работы по каблированию магистральной кабельной подсистемы;
- монтаж подсистемы рабочих мест;
- кроссировка кабельных подсистем;
- прозвонка и маркировка;
- приемосдаточные испытания;
- оформление документации.

Требования к документированию

В ходе проведения работ по проектированию ВОЛС и объектов подготавливаются:

- эскизный проект, описывающий, согласно техническому заданию, предварительные технические условия и виды работ, содержит результаты исследований, изыскательских работ и обоснований, неотъемлемой частью эскизного проекта являются протоколы согласований со всеми заинтересованными организациями как по техническим параметрам проекта, так и по экономическим;

- техническое задание на создание проекта рабочей документации, по форме может быть аналогично предыдущему, а по структуре определять состав, объем, содержание рабочей документации;

- рабочая документация:
 - общее описание системы,
 - локальные сметы,
 - технологические инструкции,
 - схема деления системы (структурная),
 - рабочие чертежи прокладки кабеля, установки технических средств и подсистем,

- программа и методика проведения испытаний на этапах приемки продукции со склада, выполнения СМР, прямо-сдаточных испытаний,
- сводный сметный расчет;
- после проведения работ перед вводом системы в эксплуатацию подготавливается документ о результатах испытаний системы, данные тестов по сертификации, которые являются основанием для выдачи гарантии на систему;
- изменения к техническому заданию и рабочей документации оформляются дополнением или подписанным ЗАКАЗЧИКОМ и ПОДРЯДЧИКОМ протоколом. Дополнение или указанный протокол являются неотъемлемой частью технического задания и рабочей документации.

Эскизный проект

Эскизный проект предназначен для оптимизации выбора решений по созданию структуры ВОЛС, ее назначению и функционированию, а также оценки затрат на реализацию того или иного варианта. Он предполагает в первую очередь проведение изыскательских работ.

Проектно-изыскательские работы проводятся в несколько этапов.

На этапе формирования требований проводятся обследование объекта (...тов), сбор и анализ данных об объекте (...тах), это позволяет определить основные требования заказчика к необходимым системам или интегрированной системе.

На этапе оформления технического задания на оснащение оборудованием учитываются все пожелания и технические требования заказчика к системе, стандарты и положения прочих нормативных документов.

Документом, обобщающим исходную информацию и являющимся итогом совместной с заказчиком деятельности, в процессе выполнения предпроектных работ является утвержденное сторонами техническое задание.

Сведения, полученные на этапе изыскательских работ, являются основой для разработки эскизного проекта, который создается на:

- систему в целом;
- модули системы или отдельным ее частям;
- элементы широкополосного доступа к узлам мультисервисной сети.

Технический проект

Проектные решения по системе и ее частям, модулям, элементам, узлам доступа, выполненные на основании согласованных вариантов реализации той или иной структуры системы, оформляются в виде пояснительной записки с соответствующими приложениями и документами на основе приведенной в эскизном проекте документацией на систему и ее части.

Документация на поставку оборудования для комплектования системы и ее частей, модулей, элементов, узлов доступа.

Пояснительная записка к техническому проекту так называемые описательные части:

- описание комплекса технических средств;
- ведомости оборудования и материалов;
- программы и методики испытаний при поставке оборудования, после монтажа, в процессе проведения пусконаладочных работ.

Рабочая документация

Производится подготовка точных чертежей, схем и таблиц, позволяющих осуществить детальную привязку компонентов системы и всех без исключения модулей, элементов, оборудования, материалов и инструментов для их установки. Это является руководством для исполнительной (...ных) организаций при проведении работ по монтажу системы.

Сметная документация

Как правило, в проектной документации существуют две структуры сметных расчетов. Первая – это так называемые локальные сметы, которые составляются на все модули, элементы, оборудование, материалы, инструменты для их установки, а также работы, связанные с выполнением тех или иных задач. Вторая – это так называемый сводный сметный расчет, характеризующий суммарные затраты на реализацию системы, в котором появляются дополнительные статьи расходов:

- выполнение работ в стесненных условиях;
- выполнение работ в зимний период;
- связанные с отсутствием или невозможностью обеспечения в полном объеме, требуемым технологическим оборудованием;
- обусловленные выполнением работ в соответствии с актами скрытых работ, которые не могли быть учтены в локальных сметах;
- непредвиденные;
- прочие.

Каждый из перечисленных выше этапов заканчивается формированием сводного комплекта документации, обеспечивающего Заказчика возможностью контроля реализации проекта и дальнейшего технического обслуживания.

Строительно-монтажные работы

Рассматриваются вопросы, связанные с особенностями реализации выбранных способов строительства ВОЛС в настоящем проекте. Эти особенности могут быть обусловлены климатическими условиями региона, где предполагается реализация системы, состоянием и наличием инфраструктуры, профилем трассы ВОЛС – особенно при выборе воздушных способов строительства, наличием различных переходов и пересечений с другими объектами. Кроме всего прочего, различные варианты реализации даже одного и того же способа строительства требуют применения различных видов технологического оборудования, которое не всегда может быть представлено даже в высокооснащенных строительно-монтажных организациях в силу огромного многообразия вариантов, диктуемых природными условиями.

Эти все особенности и окажутся определяющими при задувке, подвеске, прокладке волоконно-оптического кабеля (ВОК) в грунт, кабельную канализацию и пр., монтаже оптических муфт, кроссов, электромонтажных работах, контрольных и пусковых измерительных работах и должны быть отражены в актах скрытых работ и пр.

Пренебрежение детальным исследованием вариантов строительства и особенно вопросов реализации в привязке к конкретным условиям может привести к невозможности завершения строительства в силу существенного превышения затрат. Таких примеров очень много!

Пусконаладочные работы

Предполагается выполнение монтажа и настройки оборудования.

Основные проблемы, которые возникают, это согласование параметров аппаратуры с параметрами линии. Даже при тщательном учете всех факторов в составе проектных решений при их реализации возникает очень много проблем инсталляции. Это, прежде всего, относится к узлам коммутации, преобразовательному оборудованию, правильным измерениям параметров оптических линий (трактов), тестовые испытания, паспортизация ВОЛС и оборудования и т. д.

1.2. Возможные ошибки при разработке проекта системы

Транспортная среда на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) предназначена для объединения всех компонентов системы в единую информационную инфраструктуру. Помимо технических средств к ней могут подключаться также компьютерные сети и другие инженерные системы объектов. Передача данных по ВОЛС имеет целый ряд преимуществ, по сравне-

нию с передачей по медному кабелю, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптоволокне [5].

Проектирование современной транспортной среды должно удовлетворять определенному набору требований:

- масштабируемость подразумевает возможность наращивания пропускной способности ВОЛС и количества подключений объектов, модулей, периферийных устройств без внесения существенных изменений в логическую структуру системы и с наименьшими затратами на дополнительное оборудование;

- мультисервисность означает, что создаваемая транспортная среда должна иметь полный набор возможностей передачи видео и аудиоинформации, а также поддержку всех применяемых протоколов передачи RS-данных и Ethernet-трафика;

- отказоустойчивость ВОЛС должна обеспечиваться за счет резервирования основных узлов и блоков активного оборудования, создания резервных каналов связи и применения современных средств управления потоками данных;

- перспективность созданной ВОЛС в будущем должна обеспечиваться за счет наращивания ее пропускной способности оптическими методами;

- преемственность обеспечивает предоставление дополнительных возможностей без существенных изменений в составе имеющегося активного оборудования и кабельной инфраструктуры.

Рынок поставщиков оборудования ВОЛС и решений на их основе в России находится на стадии интенсивного роста. Среди его фигурантов – и недавно появившиеся, и уже известные компании.

Заказчику порой бывает трудно разобраться во всем многообразии предлагаемых систем, а оценить качество установленных компонент становится просто нереально.

Это неизбежно приводит к ошибкам – как тривиальным, так и фундаментальным. На тривиальных ошибках (например, некорректный расчет оптического бюджета) можно не останавливаться. Гораздо важнее обратить внимание на ошибки фундаментальные, которые возникают при проектировании, даже, казалось бы, в самых обычных вариантах решения системы. Выявление этих ошибок, знание механизма их происхождения является залогом успешного создания системы связи самого различного уровня.

Ошибка первая. Разработка ВОЛС начинается без учета генеральной схемы развития системы, сети связи региона, объекта и пр., или эта схема

выполнена непрофессионально без учета перспектив и тенденций развития рынка информационных технологий. Причиной ошибки является недооценка роли и значения перспективного планирования развития структуры связи.

Создание ВОЛС – достаточно дорогостоящее мероприятие. Правильно спроектированная и построенная транспортная среда на основе ВОЛС является одним из интегрирующих элементов любой структуры связи. Срок ее службы должен быть не менее 25 лет, за этот период ВОЛС должна пережить несколько поколений активного оборудования, аппаратуры мониторинга и средств доступа. Расчет требуемой пропускной способности ВОЛС должен базироваться с учетом закона Мура, согласно которому каждые 1,5 года происходит удвоение числа транзисторов в микропроцессоре и, соответственно, передаваемого количества информации.

Необходимо помнить, что последующая реконструкция ВОЛС из-за неправильного выбора ее роли в структуре связи обойдется очень дорого.

Правильно заложенный «фундамент» транспортной среды является залогом успешной и эффективной ее эксплуатации. Разработка схемы ВОЛС должна учитывать все этапы создания структуры связи, потребности ее пользователей на долгосрочную перспективу, внедрение новых технологий. Эта разработка должна быть технически обоснована и подкреплена экономическими расчетами.

Ошибка вторая. Необоснованный выбор типа оптического волокна для оптического кабеля (ОК). Проектные организации не уделяют особого внимания выбору типа оптического волокна и выбору его производителя. Для проектировщика важно, чтобы световод обеспечивал требуемую пропускную способность с учетом прогнозируемых модернизаций в течение срока службы оптического кабеля. Для заказчика определяющими часто являются соображения экономического плана.

В настоящее время многомодовое волокно (МОВ) дороже одномодового в среднем на 30%, но дешевизна соответствующего активного оборудования зачастую становится определяющей в выборе многомодовых решений в силу их интегральной низкой стоимости, это характерно для локальных, объектовых структур связи. Для ВОЛС первичной сети, как правило, выбирают одномодовое оптическое волокно (ООВ). Однако, существующие в настоящее время 4 рекомендации МСЭ по применению ООВ предполагают различные варианты его использования и, естественно, стоимость этих вариантов тоже различна. При неправильном выборе оптического волокна для ОК значительно сужаются возможности оптимизации топологии ВОЛС – все

сводится к тривиальным «точка-точка» или «звезда». Отсюда – отсутствие гибкости при модернизации и ограниченные возможности по предоставлению мультисервисных услуг.

Необходимо подчеркнуть, что предпочтительным является построение всей транспортной среды на волокнах одной фирмы-изготовителя. В настоящее время параметры одного и того же типа волокон для разных изготовителей имеют очень близкие значения, надежность волокон разных фирм примерно одинаковая. Объясняется это очень просто – практически все отечественные производители используют одни и те же импортные световоды, «одевая» их в российскую броню. Поэтому выбор фирмы-поставщика волокон определяется в основном набором сервисных услуг фирмы и ценой, которую предлагает поставщик. Проектировщику рекомендуется самому выбрать поставщика волокон и определить требования к волокнам и условиям их работы. Применение волокон одного типа, одного изготовителя упрощает последующую эксплуатацию ВОЛС и ее ремонт.

Кроме того, однородную транспортную среду можно в дальнейшем модернизировать более мощными системами передачи с меньшими проблемами, чем сеть, состоящую из волокон разных фирм-изготовителей.

Ошибка третья. Консервативный выбор активных компонентов ВОЛС. Причина – неоптимальный выбор технических средств передачи информации в ВОЛС – объясняется неполным исследованием рынка аппаратуры и попытками выбора более дешевой, но менее функциональной.

Объемы продаж и, главное, номенклатура активного оборудования ВОЛС в России достаточно скромные в силу различного рода ограничений на ввоз последнего. Поэтому заказы на поставку активных компонентов ВОЛС небольшие и номенклатура аппаратуры в режиме поставки «со склада» невелика. Это приводит к тому, что нередко проектно-монтажные организации не могут подготовить выигрышные коммерческие предложения, опираясь на наиболее передовые достижения оптических методов передачи информации, довольствуясь апробированными решениями.

В условиях лимита цены и реальных сроков поставок активных компонентов (2 мес. и более) производители работ переходят на аппаратуру низшей ценовой категории либо идут на заведомые подлоги.

Самое распространенное поведение инсталлятора в условиях жесткого конкурса заключается в том, что он соглашается удовлетворить все требования заказчика, а после победы в конкурсе на стадии подписания контракта

или в процессе поставок отыгрывает назад заведомо невыполнимые или трудновыполнимые требования, прикрываясь различными причинами.

Ошибка четвертая. Неправильный выбор подрядчика при создании ВОЛС. Чаще всего заказчик выбирает подрядчика, исходя только из экономических соображений. При этом, как правило, должным образом не учитывается профессионализм специалистов компании. Создание ВОЛС – сложный, высокотехнологичный процесс, при котором важно, чтобы подрядчик был надежным и квалифицированным – ошибки и плохое качество монтажа оборачиваются большими эксплуатационными затратами. При выборе подрядчика необходимо проверить его опыт в создании ВОЛС, оснащение монтажников современными техническими средствами, подготовку и степень квалификации инженерно-технического персонала компании. Желательно провести инспекцию состояния компании-подрядчика силами независимых экспертов. Главное в выборе подрядчика – высокий профессионализм, позволяющий обеспечить гарантированное качество монтажа активных и пассивных компонентов. Даже большая стоимость работ такой компании с лихвой окупается меньшими затратами на последующую эксплуатацию аппаратуры.

Ошибка пятая. Неправильная приемка технических средств или ее отсутствие. Заказчик должен обеспечить правильную приемку технических средств для ВОЛС у поставщиков активных и пассивных компонентов. Приемка должна быть сплошной и должна проводиться по всем важнейшим техническим параметрам. В первую очередь, это касается оптических кабелей и аппаратуры линейного тракта. Заводской брак технического средства, поступившего в монтаж, может привести к большим потерям для его устранения после окончания работ. Никакие гарантии поставщика не смогут компенсировать возможные потери из-за брака. Например, обрыв волокон или рост затухания в них под воздействием внешних воздействий потребует замены кабеля, при этом возможно прекращение функционирования всей системы связи или отдельных ее частей.

Не менее важен входной контроль приемопередающего оборудования. Все мы привыкли работать с «data sheet», а не техническими паспортами изделий. Но мало кто обращает внимание на фразу «производитель оставляет за собой право менять технические характеристики изделия без предварительного уведомления». Разработчики в любой стране мира страдают схожими болезнями – для них творчество важнее бизнес-процесса. Поэтому и появляются то самое отсутствие «предварительного уведомления», головная боль

инсталлятора и недоумение пользователя – все работает совсем не так, как обещалось.

Ошибка шестая. Неправильно организованный технический надзор за проектированием и строительством. Очень часто технический надзор за проектированием и монтажом проводится бессистемно или не проводится вовсе. Причиной этого является отсутствие или слабость эксплуатационных служб многих заказчиков и конечных пользователей, а также недостаток соответствующей нормативно-технической документации.

Целью технического надзора за созданием ВОЛС является проверка соблюдения подрядчиком всех технологических нормативов и принятых проектных решений. Технический надзор должен сопровождать все этапы проектирования и монтажа ВОЛС. Лучшее выполнение технического надзора осуществляется специалистами технических служб дистрибьютора оборудования, прошедшими специальное обучение.

Заказчик, к которому переходит в собственность создаваемая ВОЛС, в наибольшей степени заинтересован в ее высокой эксплуатационной надежности. Если у него нет специалистов по эксплуатации ВОЛС, для проведения технического надзора следует привлекать сторонних экспертов, имеющих соответствующую квалификацию.

Обязательным условием проведения технического надзора является наличие норм на проверяемые параметры ВОЛС, методик и правил проверок этих норм.

Разработка и утверждение таких норм и методик должны являться обязательной частью проектных работ. Специалисты технического надзора должны иметь исчерпывающую документацию для проверки правильности хода выполнения работ по проектированию и строительству ВОЛС.

Ошибка седьмая. Неправильная организация обучения специалистов. Некоторые заказчики не придают особого значения квалификации специалистов проектно-монтажных организаций, предполагая выставление штрафных санкций за ошибки при проведении работ. Однако многие ошибки при создании ВОЛС носят скрытый характер, и их последствия проявляются не сразу.

Создание и эксплуатация ВОЛС требуют подготовки специалистов соответствующего уровня, поэтому экономить на обучении специалистов нельзя. Особенно важно обучать специалистов при использовании новых технологий быстрого монтажа волоконно-оптических кабелей, применении новых активных компонентов с оптическим мультиплексированием.

Перед началом монтажных работ обучение должны пройти специалисты монтажной организации и специалисты по проведению технического надзора, а к сдаче ВОЛС в эксплуатацию – специалисты соответствующей службы заказчика.

Перечисленные ошибки при создании ВОЛС являются главными и определяющими. К сожалению, очень часто и заказчик, и проектировщик, и подрядчик знают, в чем недостатки проекта и технических решений, но в силу тех или иных обстоятельств вынуждены их принимать. Найдите способы избежать этого, и вы получите профессиональное решение поставленных задач при хорошем качестве и за разумные деньги.

1.3. Некоторые примеры реализации разделов технического задания

Схема организации связи. В структуре связи района (губернии) должна быть отражена перспектива развития, а именно обеспечение всеми услугами мультисервисных сетей. Прежде всего, это – телефония со всеми услугами, которые предоставляют современные операторы (около сотни), а на селе они очень актуальны. Доступ в интернет – может быть и не самый высокоскоростной, но он должен быть! Безусловно, современное телевидение, это построение сетей цифрового ТВ. Множество других услуг связи, которые доступны в крупных городах, и могут представлять интерес и для внутризоновых потребителей.

Примерная схема сети связи (рис. 1.1) районного центра (внутризоновые ВОЛС), которая может обеспечить распределение всех основных элементов мультисервисных сетей и применяемая, в качестве основы для технического задания. Подобная схема построения сети не только обеспечит реализацию основных потребностей в получении различных видов информации населением района, но и возможностями расширения видов транслируемой информации и построением обратных каналов. При этом затраты на ее реализацию могут быть оптимизированы, в процессе анализа конкретной ситуации, потребностей, способа строительства ВОЛС и выборе соответствующего оборудования. Необозначенным, в этой схеме, остается вопрос, откуда центральный узел «ОПОК» буде получать трафик для обеспечения всех потребителей? Это отдельная задача развития магистральной сети.

Выбор оптических волокон. Безусловно, для рассматриваемого примера, выбор оптических волокон должен осуществляться на основании оценки их стоимости. Например, одномодовые оптические волокна типа SSF в настоящее время одни из самых дешевых, но они не оптимизированы ни по

потерям на длине волны $\lambda=1,55$ мкм ни по дисперсии, ни, тем более, не предназначены для спектрального уплотнения. Выбор оптического волокна в данном примере однозначен, – это SSF, так как объем трафика невелик и его рост на ближайшие 10 – 15 лет не будет стремительным.

На магистральных ВОЛС к выбору типа оптического волокна надо подходить более серьезно – должен быть проведен анализ факторов развития региона, его положения в структуре общегосударственной сети связи, мощности сквозного трафика и пр.

Способ строительства и конструкция ВОК. Основной затратной статьёй является строительство ВОЛС и здесь надо, по возможности, объективно подойти к выбору способа строительства.

Прежде всего, это анализ существующих возможностей реализации строительства – средства, наличие машин и механизмов, вопросы закупки кабельных компонентов и оборудования и пр.

Правильный выбор способа строительства во многом определяет эффективность реализации проекта и существенно зависит от конкретных условий.

Особое внимание заслуживает анализ возможности применения на внутризоновых сетях воздушных способов строительства ВОЛС как наиболее дешевых и не требующих использования мощных машин и механизмов.

Выбор аппаратуры связи. Выбор оборудования для реализации созданной схемы организации связи очень важный момент в создании сети связи региона, поэтому нужно учитывать несколько основных положений:

- необходимо выбирать аппаратуру, соответствующую последним техническим решениям в данном разделе;
- учитывать тот факт, что любая техника (в том числе и техника связи) очень быстро дешевеет, поэтому необходимо уже на стадии проектирования рассматривать возможность замены аппаратуры на более функциональную;
- создавать и развивать систему диагностики и мониторинга, что позволит снизить эксплуатационные расходы на обслуживание системы в целом;
- технические решения аппаратных средств должны быть выстроены на единой платформе, реализованной в данном регионе, что обеспечит широкую взаимозаменяемость оборудования.

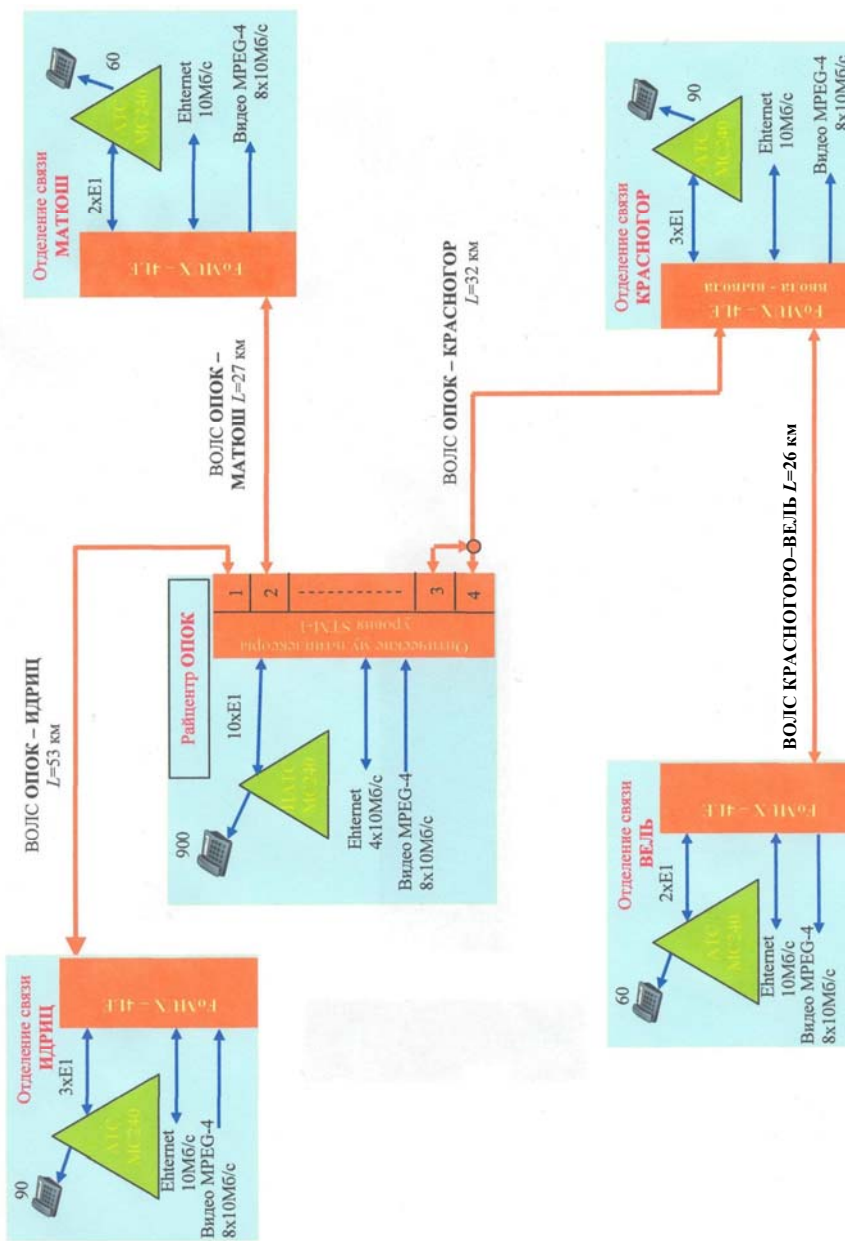


Рис. 1.1. Примерная схема сети связи районного центра



Рис. 1.2. Примерная ситуационная схема трассы ВОЛС на карте района

К примеру, для схемы организации связи (рис. 1.1) можно рассмотреть вопрос использования мультиплексов серии FoMUX (рис. 1.3) [6], предназначенных для прозрачной передачи цифровых каналов с различными интерфейсами по двум или одному оптическим волокнам. Мультиплексы обеспечивают простое и экономичное решение для одновременной передачи 4 (FoMUX-4LE) или (FoMUX-8LE) каналов E1, Ethernet 10/100 Мбит/с и асинхронного канала с интерфейсом RS-232C. Кроме того, возможна установка опционального модуля для обеспечения служебной телефонной связи. Для различной протяженности оптического канала можно выбрать различный тип лазерного приемопередатчика (до 200 км).



Рис. 1.3. Внешний вид мультиплекса FoMUX

Порт Ethernet 10/100BaseTX обеспечивает автоопределение скорости и полно- и полудуплексного режима (full/half duplex). Порты E1 с интерфейсом G.703 (Balanced) поддерживают режимы прозрачной передачи структуриро-

ванного и неструктурированного потока данных 2,048 Мбит/с. Каналы E1 передаются независимо друг от друга. Данные асинхронного порта передаются со скоростью до 115,2 кбит/с. Конфигурация устройства осуществляется с помощью DIP-переключателей. Мультиплексор выполнен в малогабаритном корпусе для настольного применения. Возможна установка в 19" стойку с помощью специального крепления. Устройство поставляется с универсальным источником питания для переменного 220 ВА и постоянного 60 В тока.

Мультиплексоры FoMUX могут работать в схеме «точка-точка» и в топологии «кольцо». При работе в топологии «кольцо» каждый интерфейс устройства (RS-232, E1, Ethernet) доступен только в двух узлах кольца. В остальных узлах этот интерфейс должен быть в режиме локального шлейфа. Наличие резервного оптического канала позволяет обеспечить надежность связи на ответственных участках сети.

Краткие технические характеристики:

- 1 или 2 оптических интерфейса с разъемом SC/LC;
- длина волны, нм: 1310, 1490, 1510, 1550, 1590;
- тип оптоволокна: одномодовое/многомодовое;
- 4/8 портов E1, скорость передачи 2048 кбит/с;
- линейный код: HDB3, импеданс: 120 Ом Balanced;

Поддержка: ITU-T G.703/ G.823/ G.742;

- 1 порт Ethernet 10/100BaseTX, Half/Full duplex;
- встроенный высокопроизводительный мост;
- 1 порт RS-232C, скорость передачи 115,2 кбит/с;
- интерфейс для подключения телефонного аппарата (требуется дополнительный модуль);
- DIP переключатели для настройки;
- светодиодные индикаторы состояния устройства;
- размеры: 261×151×45 мм;
- вес: 2,5 кг;
- установка в 19" стойку;
- напряжение питания:

AC: ~ 100–240 В; DC: = 42–64 В, макс. потребляемая мощность не более 10 Вт.

Правильно составленное техническое задание обеспечит не только существующие потребности в информационных потоках, но и развитие связей региона с минимальными затратами.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ КАБЕЛЬНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Существующая первичная сеть основана в основном на металлических кабелях связи, причем преобладающим типом является симметричный кабель, по цепям которого организованы тракты аналоговых систем передачи. Бурное развитие информационных потоков, появление новых видов передаваемой информации требует существенного увеличения трафика как на основных направлениях первичной сети, так и на внутризональных участках.

В результате сложилась ситуация, когда недостаточная развитость сети на основе использования направляющих систем с высокой пропускной способностью, прежде всего, с применением волоконно-оптических кабелей связи, сдерживает развитие информационных структур и вызывает необходимость предлагать разнообразные методы решения задач по реконструкции существующих магистральных и внутризональных линий связи первичной сети для существенного увеличения пропускной способности последних и организацией цифровых потоков.

В связи с этим возникают два варианта проведения реконструкции:

- перевод трактов на цифровое оборудование с сохранением существующей кабельной системы;
- строительство новых волоконно-оптических линий связи по той же трассе, либо, практически, новое строительство.

Рассматривая первый вариант решения задачи необходимо провести анализ основных положений по организации трактов цифровых систем передачи плезиохронной иерархии, которая является основной для металлических кабелей, с точки зрения качества организуемых каналов.

2.1. Качественные показатели функционирования цифровых трактов

Одним из основных методов решения указанной задачи является реконструкция трактов аналоговых систем передачи и организация трактов цифровых систем. Прежде всего, это относится к линиям связи на основе симметричных высокочастотных кабелей и наиболее распространенной системе К-60п, а также коаксиальных, по которым организованы тракты К-300, К-1020, К-1920 или К-3600. При этом наиболее широкое распространение получила аппаратура плезиохронной системы иерархии следующих ступеней (табл. 2.1).

Необходимо отметить, что в табл. 2.1 указана скорость на стыке в формате HDB-3, в линейной части эта скорость будет несколько выше для обеспечения уравновешенности линейного кода.

Таблица 2.1

Иерархия плезиохронных ЦСП

Степень иерархии ЦСП	Скорость передачи, Мбит/с
Первичная	2,048
Вторичная	8,448
Третичная	34,368
Четверичная	139,264

При разработке проекта реконструкции трактов, организованных по симметричным кабелям связи, используется аппаратура, как правило, не выше третичной ступени иерархии.

Важнейшим критерием оценки правильности проектных решений является обеспечение требований по качеству работы тракта, оцениваемое рядом событий ошибок, за которыми осуществляется контроль [7–9].

Контроль основан на наблюдении за четырьмя различными событиями ошибок:

- блок с ошибками (errored block, B) – блок, имеющий одну или несколько ошибок по битам;
- секунда с ошибками (errored second, ES) – отрезок времени в 1 с, в котором имеется один или несколько блоков с ошибками;
- секунда, пораженная ошибками (severly errored second, SES) – отрезок времени в 1 с, который содержит > 30% блоков с ошибками или, по крайней мере, один период с большим количеством ошибок (severly disurbed period, SDP), или сильно пораженный период;
- фоновая блочная ошибка (background block errored, BBE) – блок с ошибками, не относящийся к секунде с ошибками.

Измерение, указанных выше событий, ошибок дает абсолютные величины, но по практическим соображениям целесообразнее работать с относительными величинами:

- отношение секунд с ошибками к общему числу секунд в измерительном интервале (Errored Second Ratio, ESR);
- отношение секунд с большим количеством ошибок к общему числу секунд в измерительном интервале (Severly Errored Second Ratio, SESR);

- отношение количества блоков с ошибками к общему числу блоков в измерительном интервале (Background Block Error Ratio, BBER).

В соответствии с определением событий с ошибками при расчете коэффициента BBER исключаются все блоки во время секунд с большим количеством.

Во всех трех определениях следует учесть, что для соотношения могут браться только периоды готовности измеряемой системы передачи.

Готовность заканчивается с началом периода, который содержит минимум десять следующих друг за другом секунд с большим количеством ошибок минимум в одном направлении передачи.

Система снова находится в состоянии готовности с периода времени, состоящего из минимум 10 с и не имеющих большого количества ошибок.

В табл. 2.2. приведены целевые величины из конца в конец для опорного тракта ЦСП ПЦИ длиной 27500 км [9].

Таблица 2.2

Значения некоторых параметров ошибок

Скорость передачи, кбит/с	64	2048	8448	34368	139264
Бит/блок	–	2048	4224	4296	17408
Длительность блока, мкс	–	1000	500	125	125
ESR	0,08	0,04	0,05	0,075	0,16
SESR	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
BBER	–	3×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}

При этом требуется, чтобы цифровой тракт одновременно выполнял все целевые величины, указанные в табл. 2.2, для его скорости передачи.

В качестве интервала наблюдения предлагается временной отрезок в 1 месяц.

Проверка характеристик в условиях передачи трафика может проводиться непосредственно или статистически.

Проверка непосредственно проводится, если объект технической эксплуатации сам указывает на ухудшение рабочих характеристик, или на длительное наличие дефектов, или на подтвержденные неработоспособности.

Все сигналы первичной информации от различных датчиков либо передаются от каждого объекта в блок обработки, либо обрабатываются на месте.

Показатели рабочих характеристик определяются на основе этой информации.

Каждый из показателей рабочих характеристик (ES, SES, VBE) должен обрабатываться отдельно, чтобы рассчитать величину показателя качества работы объекта технической эксплуатации.

Неприемлемый показатель качества характеризуется степенью и длительностью ухудшения качества. Он может быть связан с состоянием неработоспособности и устанавливается путем статистического анализа индивидуально для каждого показателя рабочей характеристики за определенное время T_1 .

Как только результат статистического анализа достигнет порога M_1 (определенного для каждого объекта технической эксплуатации индивидуально), объект объявляется неприемлемым по рабочим характеристикам.

Для каждого подтвержденного состояния неработоспособности, соответствующего перерыву, длящемуся n последовательных секунд, объект технической эксплуатации считается достигшим неприемлемого уровня.

Для расчета ухудшенного показателя качества каждый параметр рабочих характеристик анализируется статистически за определенное время T_2 , которое может представлять собой достаточно большой период.

Как только результат статистического анализа достигает порога N_2 (который должен быть определен), объект может считаться объектом ухудшенного качества. Интервал времени T_2 зависит от рассматриваемого объекта.

Проверка на статистической основе влечет определенные решения в отношении технической эксплуатации:

- число раз, когда объект показал «нормальное» функционирование, сравнивается с числом раз, когда показатель качества объекта не выполнял требования;
- среднее время функционирования сравнивается со стандартным значением;
- число раз, когда объект выполнял свою функцию в течение определенного периода, в сравнении со стандартными значениями.

Если величина ухудшенного показателя качества характеризуется постепенным ухудшением качества, эксплуатационный персонал должен быть информирован, прежде чем это ухудшение качественного показателя станет неприемлемым для пользователя.

2.2. Анализ причин, вызывающих снижение качественных показателей тракторов ЦСП

Для передачи по цифровому линейному тракту информационный сигнал преобразуется в один из типов линейных кодов, характеристики которого

согласованы с параметрами кабельных цепей и к которым предъявляется целый ряд требований:

- ограничение спектра линейного кода в диапазоне частот, характеризующемся повышенным уровнем помех;
- обеспечение возможности простого и надежного выделения синхросигнала;
- обеспечение бесперебойной работы линейного тракта при любой статистике входного сигнала;
- возможность контроля за состоянием линейного тракта и линейных регенераторов в процессе их непрерывной работы.

Все реальные линии связи ограничены по полосе пропускания и имеют неравномерную амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики, что вызывает необходимость коррекции формы импульсов линейного кода с той целью, чтобы уменьшить возникновение ошибок за счет межсимвольной интерференции (МСИ). Это явление обусловлено тем, что при неравномерной амплитудно-частотной характеристике линии связи форма импульсов, передаваемых по линии, искажается, длительность фронтов возрастает и, когда она становится больше тактового интервала, импульсы могут перекрываться. Межсимвольная интерференция изменяет мгновенные значения сигнала в моменты их стробирования при регенерации и приводит к увеличению вероятности ошибки при детектировании.

Таким образом, задача построения линейной части регенератора является задачей оптимальной фильтрации, но не в ее классическом виде, когда оптимальный приемник обнаруживает сигнал в аддитивном шуме, а задачей оптимального обнаружения искаженного межсимвольной помехой сигнала на фоне аддитивной помехи.

Рассмотрим модель приемной части регенератора [11, 12] рис. 2.1. Пусть на вход линейной части регенератора поступает сигнал в виде случайной последовательности импульсов известной формы, отличающихся по уровню, и флуктуационный шум $n(t)$ с энергетическим спектром $G(\omega)$.

Обозначим через $S(\omega)$ спектральную плотность одного из используемых элементов сигнала с единичным уровнем на входе приемного фильтра, тогда спектральная плотность реакции фильтра на этот элемент сигнала

$$R(i\omega) = S(\omega)K(i\omega) = S(\omega)[\varphi(i\omega)/\nu(i\omega)],$$

где $K(i\omega) = \varphi(i\omega)/\nu(i\omega)$ – коэффициент передачи линейной части регенератора.

Определим среднюю квадратическую ошибку реакции на входе решающего устройства в момент отсчета на некоторый элемент сигнала, обусловленную воздействием шума и межсимвольной помехи. Обозначим через $c_k r(t) \leftrightarrow c_k R(i\omega)$ реакцию приемного фильтра на элемент сигнала с уровнем c_k и через $g(t) \leftrightarrow K(i\omega)$ импульсную характеристику линейной части регенератора.

Указанная ошибка для выделенного элемента сигнала с уровнем c_0 может быть записана следующим образом:

$$\sigma_{\text{ош}} = \sqrt{E \left\{ c_0 r(t_0) - \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k r(t_0 + kT) + n(t) * g(t) \right]_{t=t_0} \right\}^2}, \quad (2.1)$$

где t_0 – момент стробирования; E – символ математического ожидания; $*$ – символ свертки двух функций.

Положим, что шум является стационарным случайным процессом с нулевым средним значением, а корреляция между сигналом и шумом отсутствует.

Это справедливо как для теплового шума в коаксиальном кабеле, так и для переходной помехи в симметричном кабеле, тогда

$$\sigma_{\text{ош}}^2 = u_{\text{мп}}^2 + u_{\text{ш}}^2, \quad (2.2)$$

где $u_{\text{мп}}^2 = \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} c_n c_m r(t_0 + nT) r(t_0 + mT)$, n и m – номера тактовых интервалов, $u_{\text{ш}}^2 = \overline{[g(t) * n(t)]_{t=t_0}}^2 = \sigma^2$, $n(t)$ – аддитивная помеха.

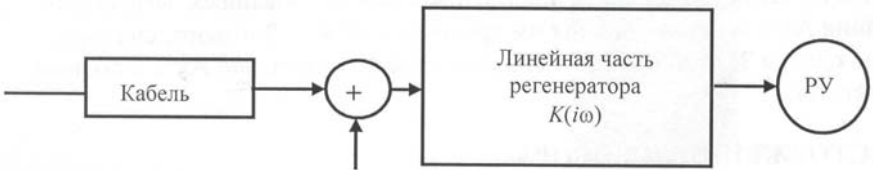


Рис 2.1. Модель приемной части регенератора

Возрастание значения ВВЕР или вероятности возникновения ошибки происходит в том случае, когда в момент стробирования мгновенное напряжение помех, действующих на входе линейного регенератора и определяемое различными факторами, превышает допустимое значение.

В общем случае суммарная мощность линейных помех, возникающих в кабельных цепях без учета помех от внешних электромагнитных полей, может быть представлена в следующем виде [9, 13]:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{пвдк}} + N_{\text{пвбк}} + N_{\text{пп}} + N_{\text{тш}}, \quad (2.3)$$

где $N_{\text{пвдк}}$ – мощность помех за счет переходных влияний на дальнем конце, обусловленная значением защищенности на дальнем конце цепи A_3 ;

$N_{\text{пвбк}}$ – мощность помех за счет переходного влияния на ближнем конце, обусловленная значением защищенности на ближнем конце цепи A_0 ;

$N_{\text{пп}}$ – мощность помех за счет попутных и встречных потоков, обусловленная неоднородностями волнового сопротивления линии $\Delta Z_{\text{в}}$;

$N_{\text{тш}}$ – мощность теплового шума. Для различных типов металлических направляющих систем (симметричный или коаксиальный кабель) преобладают те или иные составляющие суммарной мощности помех.

Подробный анализ закона распределения мощности суммарных помех, проводимый многими исследователями [12, 13], показывает, что закон распределения значений напряжения аддитивной помехи близок к нормальному. Учитывая, что для большинства линейных кодов (например, 5В6В) с амплитудой импульса, равной A , модуль порогового напряжения $D \approx A/2$.

В этом случае вероятность ошибки на длине участка регенерации ($P_{\text{ур}}$) может быть определена следующим образом:

$$P_{\text{ур}} = 1 - \Pi \left(\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}} \right), \quad (2.4)$$

где Π – интеграл Лапласа–Гаусса; N_{Σ} – суммарная мощность линейных помех на входе линейного регенератора, а $\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}}$ принято называть отношением сигнал/шум. Если принять вероятность ошибки (значение VBER) на длине участка регенерации $P_{\text{ур}} = 10^{-10}$, решая (1.4), получим $\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}} = 6,47$, при этом

$$N_{\Sigma} = 0,006A^2, \quad 20\lg\left(\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}}\right) = 16,2 \text{ дБ.}$$

Таким образом, как показывают простейшие вычисления для идеального линейного регенератора, у которого отсутствуют межсимвольные искажения, вероятность ошибки на длине участка регенерации не будет превышать значения 10^{-10} , если соотношение сигнал/шум на его входе будет не менее 16,2 дБ.

В реальных линейных регенераторах, как показано в [11, 12], оптимальное соотношение между межсимвольными искажениями и мощностью линейных помех достигается в том случае, когда мгновенное значение изменения сигнала за счет МСИ составляет 0,25 от порогового напряжения, поэтому для реального регенератора

$$P_{ур} = 1 - \Pi(1 - 0,25) \left(\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}} \right). \quad (2.5)$$

В этом случае при $P_{ур} = 10^{-10}$; $0,75 \left(\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}} \right) = 8,32$; $N_{\Sigma} = 0,00336A^2$,

$$20 \lg \left(\frac{A}{2\sqrt{N_{\Sigma}}} \right) = 18,7 \text{ дБ}.$$

Таким образом, теоретически, для реального регенератора отношение сигнал/шум на входе решающего устройства должно быть не менее 18,7 дБ.

Практически, с учетом всех дестабилизирующих факторов работы трактов ЦСП, а также для обеспечения определенного запаса по помехоустойчивости, отношение сигнал/шум на входе решающего устройства при использовании наиболее распространенных линейных кодов принимают равным не менее 26 дБ. Для высокоскоростных ЦСП необходимое соотношение сигнал/шум устанавливается путем анализа особенностей организации работы последних. Установленная величина допустимого соотношения сигнал/шум на входе линейного регенератора является основанием для определения длины участка регенерации по критерию обеспечения помехоустойчивости тракта.

В общем случае длина регенерационного участка будет определяться двумя факторами. Первый – это перекрываемое аппаратурой ЦСП затухание, второй – это широкополосность линии связи, которая в металлических кабелях ограничена шумами. Сказанное можно пояснить на графике (рис. 2.2).

В зависимости от выбранной аппаратуры ЦСП, которая имеет определенное значение перекрываемого затухания с требуемым запасом по помехоустойчивости – $a_{доп}$, и конкретного значения скорости передачи (тактовая частота линейного кода), т. е. требуемую широкополосность $\Delta F_{доп}$ можно определить значения двух длин участка регенерации – по затуханию и по значению линейных шумов.

Основное условие правильного расчета длин участка регенерации:

$$L_{\Delta F} \geq L_a, \quad (2.6)$$

Таким образом, учитывая указанные факторы можно осуществить реконструкцию действующих магистралей первичной сети как на симметричном, так и на коаксиальных кабелях связи. Однако в связи с сокращением длин участков регенерации при организации более высокоскоростных трактов растет количество активного оборудования и соответственно снижается надежность тракта.

2.3. Основные соотношения и расчетные выражения при реконструкции на основе организации трактов ЦСП

Основной задачей реконструкции является правильная оценка длин участков регенерации для того или иного кабеля связи при той или иной схеме организации связи [9, 10, 12].

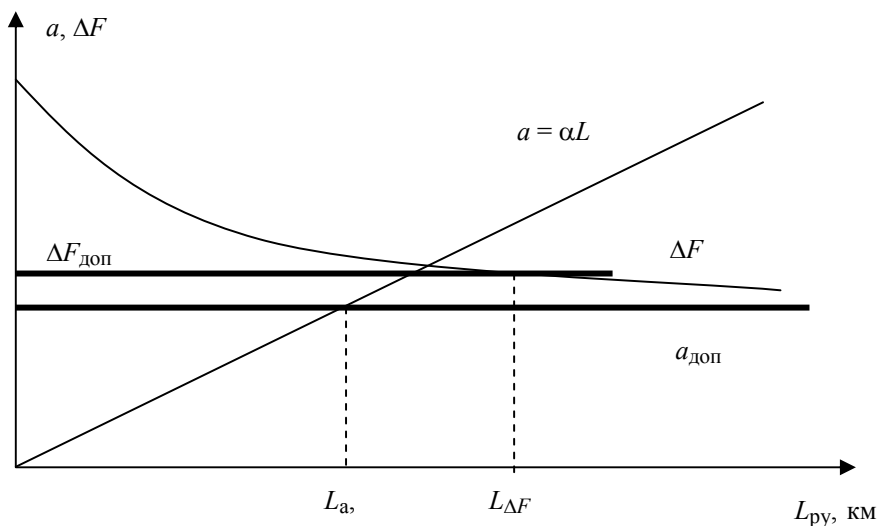


Рис. 2.2. Возможные варианты сравнительной оценки длин участков регенерации:

a , $a_{доп}$ – затухание линии, ΔF – широкополосность линии,

$\Delta F_{доп}$ – скорость передачи применяемого оборудования

На городских сетях, прежде всего на соединительных линиях, где применяются многопарные низкочастотные кабели связи, цифровые системы передачи работают в однокабельном режиме, т. е. оба направления передачи находятся в одном кабеле, основной причиной вызывающей рост шумов являются переходные влияния на ближний конец.

В этом случае длину регенерационного участка можно определить из неравенства:

$$\alpha L \leq A_0 - \sigma - 10 \lg n - \delta, \quad (2.7)$$

где A_0 – среднее значение переходного затухания на ближнем конце для выбранной комбинации взаимовлияющих пар на полутактовой частоте;

σ – среднеквадратическое отклонение переходного затухания;

αL – затухание регенерационного участка на полутактовой частоте;

n – число одновременно работающих систем передачи;

δ – требуемое соотношение сигнал/помеха.

Для двухкабельной схемы организации связи, которая повсеместно используется на магистральных и зонавых линиях, допустимую длину регенерационного участка при одновременной работе n ЦСП можно определить из неравенства:

$$A_3 - \sigma \geq 10 \lg n + \delta, \quad (2.8)$$

где A_3 – среднее значение защищенности на дальнем конце для выбранной комбинации влияния на полутактовой частоте.

В коаксиальном кабеле основным источником помех являются собственные шумы линейного тракта, поэтому длину регенерационного участка можно определять из требуемого соотношения сигнал помеха и мощности теплового шума на входе решающего устройства регенератора:

$$\alpha L \leq p - 10 \lg W_{\text{ш}} - \delta, \quad (2.9)$$

где p – уровень импульсов на передаче;

αL – затухание регенерационного участка на полутактовой частоте;

$W_{\text{ш}}$ – мощность теплового шума на входе решающего устройства;

δ – требуемое соотношение сигнал помеха.

Уровень мощность теплового шума можно определить следующим образом:

$$10 \lg W_{\text{ш}} = P_{\text{ш}} + 10 \lg B + F, \quad (2.10)$$

где $P_{\text{ш}}$ – уровень мощности шума в полосе частот 1 МГц (для теплового шума в коаксиальном кабеле около -114 дБм);

F – шум-фактор корректирующего усилителя;

B – эквивалентная полоса частот шума, которая для большинства аппаратуры ЦСП может быть определена как $0,4f_{\text{т}}$.

2.4. Реконструкция действующих кабельных магистралей на основе строительства ВОЛС

Волоконно-оптические линии связи занимают в настоящее время лидирующее место по их развитию и строительству и, если провести анализ

затрат на строительство ВОЛС и проведение реконструкции с сохранением существующего кабеля связи, можно выбрать способ строительства ВОЛС, который по затратам будет соизмерим с рассмотренным выше способом реконструкции.

Основные характеристики методов строительства ВОЛС будут приведены ниже. Эти сведения получены на основе усреднения по затратам и оценкам надежности различных фирм, прежде всего АО «Лентелефонстрой», АО «Ростелеком», АО «Ленэнерго», АО «Ставропольэнерго», АО «Дагэнерго», Таможенное управление по Северо-Западу и ряд других.

Строительство ВОЛС позволит отказаться от промежуточных необслуживаемых регенерационных пунктов, что значительно сократит количество активного оборудования и за счет этого затраты на реконструкцию будут примерно одинаковы.

В настоящее время все большее внимание уделяется возможности строительства воздушных ВОЛС, так как этот вариант не требует землеотвода. При этом в качестве несущих элементов ВОЛС используются существующие линии электропередач (ЛЭП) как магистральные, так и распределительные, а также опоры контактных сетей электрифицированных железных дорог и, безусловно, опоры воздушных линий связи. Использование широко разветвленной сети ЛЭП позволяет осуществлять строительство трех основных типов ВОЛС с использованием подвески самонесущего кабеля, прокладки специального грозозащитного троса с вмонтированным оптическим кабелем и навивки кабеля на фазовый провод или грозозащитный трос.

2.5. Расчет длины участка регенерации волоконно-оптической системы передачи (ВОСП)

Точно так же как и для металлических кабелей, основной задачей при реконструкции с переходом на ВОЛС является правильная оценка длины участка регенерации [10].

При проектировании ВОЛС должны рассчитываться отдельно длина участка по затуханию (L_a) и длина участка регенерации по широкополосности ($L_{ш}$), так как причины, ограничивающие предельные значения указанных длин, независимы.

В общем случае целесообразно рассчитывать три величины участка регенерации, две – по затуханию и одну – по широкополосности:

$L_{a \max}$ – максимальная проектная длина участка регенерации;

$L_{a \min}$ – минимальная проектная длина участка регенерации;

$L_{ш}$ – проектная длина участка регенерации по широкополосности.

Для оценки этих величин используются выражения [3, 4, 10]:

$$L_{a \max} = \frac{(A_{\max} - M - nA_{\text{pc}})}{\left(\alpha_{\text{ок}} + \frac{A_{\text{нс}}}{L_{\text{стр}}} \right)}, \quad (2.11)$$

$$L_{a \min} \geq \frac{A_{\min}}{\alpha_{\text{ок}} + \frac{A_{\text{нс}}}{L_{\text{стр}}}}, \quad (2.12)$$

$$L_{\text{ш}} \leq \frac{4,4\text{Ч}10^5}{D \cdot d \cdot B}. \quad (2.13)$$

где A_{\max} , A_{\min} – максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания аппаратуры ВОСП, обеспечивающее к концу срока службы значение ВВЕР не более 1×10^{-10} ;

$\alpha_{\text{ок}}$ – километрическое затухание в оптических волокнах кабеля, дБ/км;

$A_{\text{нс}}$ – среднее значение затухания мощности оптического излучения неразъемного оптического соединителя на стыке между строительными длинами кабеля на участке регенерации, дБ;

$L_{\text{стр}}$ – среднее значение строительной длины кабеля на участке регенерации, км;

A_{pc} – затухание мощности оптического излучения разъемного оптического соединителя, дБ;

n – число разъемных оптических соединителей на участке регенерации;

D – суммарная дисперсия одномодового оптического волокна, пс/нм·км;

d – ширина спектра источника излучения, нм;

B – широкополосность цифровых сигналов, передаваемых по оптическому тракту, МГц;

M – системный запас ВОСП по кабелю на участке регенерации, дБ.

Если по результатам расчета $L_{\text{ш}} < L_{a \max}$, то для проектирования должны быть выбраны аппаратура или кабель с другими техническими данными (D , d), обеспечивающие больший запас по широкополосности на участке регенерации. Расчет должен быть проведен снова.

Критерием окончательного выбора аппаратуры или кабеля должно быть выполнение соотношения

$$L_{\text{ш}} > L_{a \max}. \quad (2.14)$$

Максимальное значение перекрываемого затухания (A_{\max}) определяется как разность между минимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и чувствительностью приемника:

$$P_{\text{изл min}} - P_{\text{min пр}} = A_{\max} \cdot \quad (2.15)$$

Минимальное значение перекрываемого затухания (A_{\min}) определяется как разность между максимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и перегрузкой приемника:

$$P_{\text{изл max}} - P_{\text{max пр}} = A_{\min} \cdot \quad (2.16)$$

Системный запас (M) учитывает изменение состава оптического кабеля за счет появления дополнительных ремонтных вставок, сварных соединений, а также изменения характеристик оптического кабеля, вызванных воздействием окружающей среды и ухудшением качества оптических соединителей в течение срока службы, и устанавливается при проектировании ВОСП исходя из ее назначения и условий эксплуатации оператором связи, в частности, из статистики повреждения (обрывов) кабеля в зоне действия оператора. Диапазон устанавливаемых значений системного запаса лежит, как правило, в пределах 2–6 дБ, что соответствует наиболее или наименее благоприятным условиям эксплуатации ВОЛС.

Приведенные выражения позволяют оценить максимальные длины участков регенерации на оптическом волокне типа SSF. Для других типов волокон должны быть внесены коррективы [14,15, 19] при применении оптических волокон с минимизированными потерями на $\lambda=1,55$ мкм или с минимизированной дисперсией, а также при использовании принципов DWDM.

Реально существует вполне конкретная длина участка сети между населенными пунктами или узлами связи. Эта длина может быть как больше расчетной максимальной, так и меньше. Структура ВОЛС – оконечные пункты, пункты выделения, ответвления потоков, определенные в Техническом задании (рис. 1.1), могут быть расположены самым неопределенным, но вполне конкретным образом. Таким образом, предыдущий расчет показывает на что в отношении длин и при выбранных скоростях передачи может рассчитывать проектировщик, но не дает ответа на вопрос, а что делать, если участок ВОЛС необходим значительно короче?

Это приводит к появлению еще одной оценки длины участка, а именно бюджета ВОЛС, который связывает характеристики предполагаемой к использованию аппаратуры и параметры передачи ВОЛС.

Другими словами, любая аппаратура, предназначенная для организации цифровых потоков того или иного уровня иерархии, имеет в составе прочих выходные и входные характеристики. Прежде всего, к ним относятся уровни мощности оптического излучения и закон ее изменения в процессе эксплуатации на рабочей длине волны, а также чувствительность приемника и его перегрузочная способность, т. е. динамический диапазон работы аппаратура.

Учитывая тот факт, что при использовании одномодовых оптических волокон, потери которых невелики, суммарное затухание ВОЛС может оказаться гораздо меньше, чем этого требует динамика работы аппаратуры, что приведет к существенному росту параметров ошибок.

Количественно бюджет линии можно оценить следующим образом:

$$(P_{\text{изл max}} - \Delta P_{\text{изл}}) - P_{\text{пр min}} \geq \alpha L_{\text{пу}} + \Delta a \geq (P_{\text{изл max}} - \Delta P_{\text{изл}}) - P_{\text{пр max}}, \quad (2.17)$$

где $\Delta P_{\text{изл}} = P_{\text{изл max}} - P_{\text{изл min}}$; Δa – пределы изменения затухания оптического аттенуатора, установленного для регулировки потерь в линии.

Безусловно, реконструкция кабельной магистрали путем строительства новой ВОЛС, это более перспективное решение, но оно связано как с экономическими проблемами, так и с техническими. Прежде всего, это выбор способа строительства ВОЛС, определяемый естественными природными условиями региона, наличием развитой инфраструктуры (автомобильных дорог в первую очередь), оценками вероятности повреждаемости ВОЛС и возможностями скорейшего ее восстановления, так как трафик, транслируемый по ВОЛС, несоизмеримо больше, чем по металлическим линиям связи и, соответственно, потери доходов будут больше.

2.6. Реконструкция существующих одномодовых ВОЛС первичной сети

Наряду с проблемами реконструкции металлических линий связи начинают возникать проблемы и с реконструкцией ВОЛС.

Основные направления реконструкции могут быть сформулированы следующим образом:

- перевод существующей магистрали с длины волны 1310 нм на длину волны 1550 нм; за счет уменьшения коэффициента затухания ОВ существует возможность увеличения скорости передачи волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и/или увеличения длины регенерационных участков;
- использование модулей-компенсаторов дисперсии, которые уменьшают дисперсионное расширение оптических импульсов в линейном тракте;

- использование оптических усилителей (ОУ) в линейном оптическом тракте; ОУ могут использоваться в качестве усилителя мощности на выходе регенератора, предварительного усилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ) и линейного усилителя;

- использование систем спектрального уплотнения DWDM, которые позволяют по одному ОВ организовать несколько высокоскоростных потоков (до 100 и более);

- использования для связи оптических солитонов, которые позволяют резко увеличить скорости передачи и длины регенерационных участков.

Для их анализа необходимо определиться с оптическими волокнами, которые используются на сети.

2.7. Параметры современных одномодовых оптических волокон

В настоящее время подавляющее большинство проложенных одномодовых оптических кабелей содержат стандартные оптические волокна (SSF), которые имеют длину волны нулевой дисперсии $\lambda_{0D} \approx 1310$ нм. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ) G-652 эти оптические волокна (ОВ) должны иметь параметры, приведенные в табл. 2.3 [10, 16, 19]. Там же для сравнения приведены параметры и других одномодовых ОВ.

Ведущие производители одномодовых ОВ обеспечивают качество своих изделий в соответствии с рекомендациями МСЭ:

SSF – стандартное оптическое волокно с нулевой дисперсией на $\lambda_{0D} \approx 1310$ нм;

DSF – оптическое волокно со смещенной нулевой дисперсией вблизи $\lambda_{0D} \approx 1550$ нм;

LMF – оптическое волокно с минимизированными потерями на $\lambda \approx 1550$ нм;

±NZDSF – оптическое волокно с расширенным окном прозрачности в районе $\lambda \approx 1550$ нм для возможности эффективного спектрального уплотнения (DWDM), а также в качестве компенсатора дисперсии.

Таблица 2.3

Классификация типов волокна согласно рекомендациям МСЭ-Т

Параметры оптических волокон	G.652	G.653	G.654	G.655
Тип волокна	SSF	DSF	LMF	±NZDSF
Окна прозрачности, нм	1300/1550	1500–1600	1550	1530–1565

Окончание табл. 2.3

Параметры оптических волокон		G.652	G.653	G.654	G.655
Тип волокна		SSF	DSF	LMF	±NZDSF
Затухание, дБ/км	1310 нм	<1,0/0,34	<1,0	н/н	н/н
	1383 нм (максимум ОН)	<2,0	<2,0	н/н	н/н
	1550 нм	<0,5/0,25	<0,5/0,25	<0,22/ 0,15–0,19	<0,35/ 0,19–0,25
Диаметр поля моды, мкм	1310	9,0–10,0	н/н	н/н	н/н
	1550	9,0–10,0	7,0–8,3	10,5	8–11
Длина волны отсечки (кабеля/волокна)		1260/1280	1270/–	1350/1530	<1480/ <1470
Длина волны нулевой дисперсии, нм		1310±10	1550±25	1310±10	н/н
Наклон кривой <i>D</i> при нулевой дисперсии, нс/нм/км		0,093	0,085	0,06	<0,169

Стандарты, определяющие типы оптических волокон согласно рекомендациям МСЭ-Т.

- G.650 дает общие определения типов волокон, перечень основных характеристик и параметров одномодовых волокон, а также методов измерения и контроля этих параметров.

- G.651 распространяется на многомодовое оптическое волокно с диаметром световедущей жилы 50 мкм и оболочки 125 мкм и на ВОК на его основе. В нем содержатся рекомендации по основным параметрам этих волокон, контролируемым характеристикам и допустимым нормам. Этот тип волокна в настоящее время используется только в коротких, внутриобъектовых ВОЛС с рабочей длиной волны 0,85 и редко 1,31 мкм.

- G.652 одномодовое волокно с несмещенной дисперсией, получило широкое распространение с 1983 года. Его параметры оптимизированы для диапазона длин волн 1,31 мкм, в котором волокно имеет нулевую хроматическую дисперсию и минимальное затухание. Диаметр световедущей жилы волокна – 9 мкм, а оболочки – 125±2 мкм. Это волокно используется для одноволновой и многоволновой передачи (спектральное уплотнение), в том числе в диапазоне длин волн 1,55 мкм, и обеспечивает передачу информации со скоростями до 10 Гбит/с на средние расстояния (до 50 км). Использование волокна G.652 при более высоких скоростях передачи требует усложнения оконечной аппаратуры, что, в свою очередь, приводит к значительным финансовым затратам.

- G.653 распространяется на одномодовое волокно со смещенной нулевой дисперсией в области $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно имеет нулевую дисперсию в области минимальных потерь волокна, что достигается за счет более сложной структуры световедущей жилы, а именно специально заданному распределению коэффициента преломления по диаметру жилы. Волокно типа G.653 используется в протяженных магистральных широкополосных линиях и сетях связи, обеспечивает передачу информации на несколько сотен километров со скоростями до 40 Гбит/с. Однако по нему можно передавать только один спектральный канал информации, т. е. оно не может быть использовано в волоконно-оптических системах и сетях, в которых применяются волоконно-оптические усилители и плотное оптическое спектральное мультиплексирование (DWDM-технологии). Причина этого заключается в высоких уровнях световой мощности в волокне после усиления и высокой плотности спектрального уплотнения, т. е. необходимости одновременной передачи большого числа независимых спектральных каналов по одному волокну.

- G.654 содержит описание характеристик одномодового волокна и кабеля, имеющих минимальные потери на $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно было разработано для применения в подводных ВОЛС. За счет больших чем у волокна стандарта G.653 размеров световедущей жилы, оно позволяет передавать более высокие уровни оптической мощности, но в то же время обладает более высокой хроматической дисперсией в диапазоне $\lambda=1,55$ мкм. Волокно типа G.654 не предназначено для работы на какой-либо другой волне излучения кроме $\lambda=1,55$ мкм.

- G.655 относится к волокну со смещенной ненулевой дисперсией – NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Это волокно предназначено для применения в магистральных волоконно-оптических линиях и глобальных сетях связи, использующих DWDM-технологии в диапазоне длин волн 1,55 мкм. Волокно имеет слабую, контролируемую дисперсию в С-полосе ($\lambda=1,53$ – $1,56$ мкм) и большой диаметр световедущей жилы по сравнению с волокном типа G.653. Это снижает проблему четырехволнового смешения и нелинейных эффектов и открывает возможности применения эффективных волоконно-оптических усилителей.

Приведенная классификация оптических волокон по основным характеристикам дана с точки зрения пользователя. Однако следует иметь в виду, что у производителей и поставщиков может быть своя классификация и маркировка, связанная с особенностями производства. Тем не менее данные ма-

териалы помогут потребителям правильно сориентироваться при выборе ВОК для строительства новых и расширения действующих ВОЛС.

Анализируя данные по типам ОВ (рис. 2.3), которые могли быть использованы в первоначальном варианте проектирования и строительства ВОЛС, необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев были использованы стандартные ОВ.

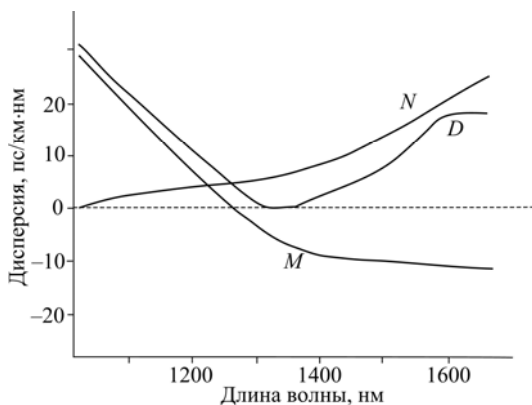


Рис. 2.3. Зависимости коэффициентов волновойдной, материальной и результирующей дисперсий от длины волны

су целого комплекса сооружений в другое место. Этот факт приводит к поиску путей, которые бы позволили при сохранении существующей структуры ВОЛС решить задачу увеличения скорости передачи и пропускной способности ВОЛС [17].

Сказанное выше, еще раз подчеркивает необходимость тщательной проработки технического задания на проектирование ВОЛС, чтобы в последующем не возникало проблем, связанных с реконструкцией ВОЛС и ростом проходящего трафика.

Однако, что делать, если это не учтено?

Прежде всего, определиться, если длина участка позволяет (по затуханию) и ограничена только по дисперсии за счет желания увеличить скорость передачи, целесообразно применить компенсаторы дисперсии. Это отрезки оптического волокна с так называемой отрицательной дисперсией, выполненные на основе балансировки дисперсии.

Меняя форму профиля показателя преломления (глубину провалов), существует возможность создавать NZDS-волокна как с положительной, так

Как известно, длина участка регенерации и скорость передачи связаны, практически, обратной пропорциональной зависимостью, поэтому если стоит задача увеличить скорость передачи (т. е. пропускную способность ВОЛС), необходимо уменьшать длину участка регенерации. На практике это в большинстве случаев неосуществимо или связано с очень большими затратами по переносу

и с отрицательными величинами дисперсии, что открывает возможность сбалансировать дисперсию в оптической линии без использования дополнительных устройств (рис. 2.4) [18].

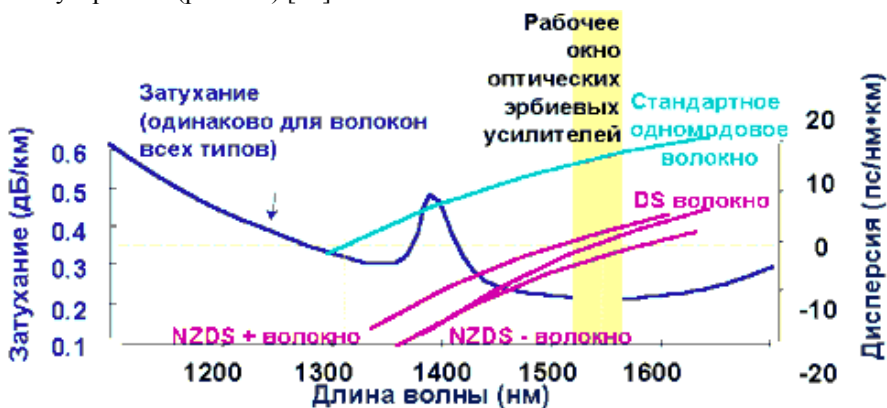


Рис. 2.4. Схема балансировки дисперсии в оптической линии

Суть его в том, что отрезки волокон с положительной и отрицательной дисперсиями чередуются, в результате чего, вызванные дисперсией искажения импульса сигнала в «плюс»-волокне компенсируются в «минус»-волокне. При этом в любой точке линии существует необходимый для подавления нелинейных эффектов уровень дисперсии.

Существует также возможность компенсировать дисперсию и в линиях, построенных из стандартного волокна, установкой в линию волоконных дисперсионных компенсаторов. Дисперсионный компенсатор представляет собой бухту из волокна с большим уровнем дисперсии. Однако встраивание в линию таких компенсаторов приводит к необходимости увеличения мощности, а соответственно, и стоимости оптических усилителей.

2.8. Расчет длины регенерационного участка с использованием компенсаторов дисперсии

Исходными данными для расчета длины участка регенерации реконструируемой ВОЛС являются параметры:

- количество и длина всех участков регенерации,
- марка и параметры, используемых ОВ,
- вносимое затухание на всех существующих участках регенерации,
- рефлектограммы всех ОВ, измеренные с двух сторон, для всех регенерационных участков,
- новой волоконно-оптической системы передачи:

- длина волны излучения λ , мкм,
- ширина спектра излучения $\Delta\lambda$, мкм,
- мощность излучателя P_0 , мВт,
- скорость передачи в линейном тракте C_T .

Существующая методика расчета длины регенерационного участка [4, 10, 13] состоит из двух независимых расчетов затухания и дисперсии, которая отличается простотой, но имеет ряд неточностей.

При расчете по затуханию не учитывается увеличение затухания для коротких оптических импульсов из-за дисперсионного уширения импульсов.

При расчете по дисперсии выбирается допустимое расширение импульса и не учитываются влияния скорости передачи на ширину спектра излучения источника и амплитудно-частотной характеристики ФПУ на расширение регистрируемого импульса на входе решающего устройства.

Основные положения методики расчета максимальной длины регенерационного участка:

- определение уровня шума на входе решающего устройства регенератора в зависимости от длины регенерационного участка;
- выбор оптимального порога, отношения сигнала к шуму и вероятности ошибок в зависимости от длины регенерационного участка;
- определение максимального затухания на регенерационном участке;
- определение длин регенерационного участка и компенсирующего ОВ, исходя из одновременного выполнения условий максимального затухания и максимального расширения импульса на входе решающего устройства [19].

Основными исходными данными являются:

- длительность такта линейного кода T_T ;
- дисперсия групповых скоростей β_2 или хроматическая дисперсия D_x , между которыми существует однозначная связь

$$D_x = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2; \quad (2.18)$$

- коэффициент затухания на выбранной длине волны основного ОВ α и компенсационного ОВ α_k ;
- ширина спектра излучения источника $\delta\omega$ или $\Delta\lambda$, между которыми существует однозначная связь.

В результате расчетов должны быть выбраны или рассчитаны:

- длительность импульса источника T_0 ;

- постоянная времени ФНЧ τ_f ;
- коэффициент экстинкции;
- оптимальный относительный порог для решающего устройства $y_{пор}$;
- минимальное отношение сигнала к шуму SN_{min} .

Пример расчета

Определяем полуширину тактового интервала для заданной скорости передачи в линейном тракте $T_p = 1/(2 C_T)$.

Выбираем коэффициент $k = T_T/T_p$ в пределах 1,1–1,5 и определяем длительность импульса на входе решающего устройства.

Одним из вариантов выбора полуширины входного импульса является равный вклад в расширение импульса хроматической дисперсии и АЧХ ФПУ:

$$T_p^2 = T_l^2 \cdot \left(1 + \frac{\tau_f}{4 \cdot T_l}\right)^2 = 2 \cdot T_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\tau_f}{4 \cdot T_l}\right)^2 = 3 \cdot T_0^2 = \frac{T_T^2}{k^2}. \quad (2.19)$$

Из (2.19) можно получить выражения для постоянной времени и ширины спектра регистрации ФПУ:

$$\tau_f = \frac{0,367}{k C_T}; \quad \Delta F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_f} = 0,434 k C_T. \quad (2.20)$$

Расчет уровня сигнала

и шума на входе решающего устройства регенератора

Будем полагать, что в качестве фотоприемника используется р-и-п фотодиод или лавинный фотодиод, а в усилитель фототока (УФТ) построен по трансимпедансной схеме (рис. 2.5).

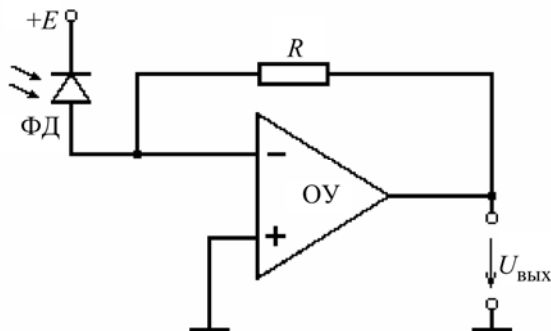


Рис. 2.5. Трансимпедансная схема фотоприемника

Приведенная схема является преобразователем фототока I_f в выходное напряжение $U_{вых}$. Коэффициент преобразования равен сопротивлению рези-

стора обратной связи R . При определении эквивалентного шумового тока ЛФД I_n , приведенного к входу УФТ, необходимо учитывать дробовой ток I_d фотодиода с учетом шума лавины, тепловые шумы U_t резистора обратной связи, шумовой входной ток операционного усилителя (ОУ) I_y и шумовое напряжение ОУ U_y , приведенное к входу [20, 21].

Для определения оптимальной длины участка регенерации L_{p0} и оптимальной длины компенсирующего ОВ L_{k0} , которые одновременно удовлетворяют условиям максимального затухания и допустимой хроматической дисперсии, необходимо решить ниже приведенную систему уравнений:

$$\begin{cases} \alpha \cdot L_{p0} + \alpha_k \cdot L_{k0} + 2 \cdot A_{pc} + \frac{L_{p0}}{L_{cd}} \cdot A_{nc} + M = A_{max}, \\ \frac{T_T^2}{3} = \sqrt{1 + \delta\omega^2 \cdot \frac{T_T^2}{3}} \cdot (\beta_2 \cdot L_{p0} + \beta_{2R} \cdot L_{k0}), \end{cases} \quad (2.21)$$

где α, α_k – коэффициенты затухания основного оптического и компенсационного волокон;

A_{pc}, A_{nc} – средние потери в разъемных и неразъемных соединениях;

M – энергетический запас на ремонтные работы и старение оптических компонентов;

A_{max} – максимальный энергетический потенциал оборудования.

Решением этой системы уравнений будут выражения:

$$\begin{aligned} L_{p0} &= \frac{A_{max} - M - 2 \cdot A_{pc} - \frac{T_T^2 / (3 \cdot k^2) \cdot \alpha_k}{\beta_{2k} \cdot \sqrt{1 + \delta\omega^2 T_T^2 / (3 \cdot k^2)}}}{\alpha + \frac{A_{nc}}{L_{cd}} - \frac{\beta_2 \cdot \alpha_k}{\beta_{2k}}}; \\ L_{k0} &= \frac{T_T^2 / (3 \cdot k^2) - \beta_2 \cdot L_{p0} \cdot \sqrt{1 + \delta\omega^2 T_T^2 / (3 \cdot k^2)}}{\beta_{2k} \cdot \sqrt{1 + \delta\omega^2 T_T^2 / (3 \cdot k^2)}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Если задаться параметрами ВОСП:

$\lambda=1550$ нм, $C_T=10^{10}$ бит/с, $k=1,3$, $A=0,1$, $p_e=10^{-10}$, $SN=15,5$, $P_0=10^{-3}$; для Ge ЛФД [19–21]: $S=0,6$ А/Вт, $I_{Ty}=6 \cdot 10^{-19}$ А, $I_{In}=0$ А, $M=100$, $m=3$, $C=10^{-12}$ Ф, $T=300$ К;

параметры ОУ[19–21]: $\Delta F=5,6 \cdot 10^9$, $\tau_f=2,8 \cdot 10^{-11}$ с, $R=28$ Ом, $S_U=4,2 \cdot 10^{-17}$ В²/Гц, то расчет по окончательному выражению (2.22) дает результаты: $L_{yp}=52,3$ км и $L_{к0}=3,5$ км. При расчете также использовались данные: $a_p=0,2$ дБ, $a_{nc}=0,1$ дБ и $a_{эз}=3$ дБ.

Расчеты длин регенерационных участков по рассмотренной методике для различных скоростей передачи приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Длины участков регенерации для различных скоростей передачи

Система передачи	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с	0,155	0,62	2,5	10
R , Ом	1500	500	100	28
A_{max} , дБ	46,3	40,7	31,3	23,1
L_{yp} , км	113	98,9	74	52,3
$L_{к0}$, км	7,6	6,6	5	3,5

При практической реконструкции выбор мест установки регенераторов, а следовательно, и окончательных длин регенерационных участков проводится с учетом расположения существующих регенераторов, потребностей в выделении каналов в населенных пунктах вдоль трассы ВОЛС и других факторов. При этом решающим критерием являются расходы на реконструкцию и последующую эксплуатацию ВОЛС.

После окончательного выбора длин регенерационных участков необходимо выбрать тип компенсирующего модуля или модулей и определить места их установки. Параметры модулей фирмы Corning приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Параметры модулей компенсации фирмы Corning

Тип модуля	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DCM-95
Компенсируемая длина линии, км	20	40	60	80	95
Дисперсия волокна модуля, пс/нм·км	-329±5	-658±10	-988±10	-1317±15	-1564±15
Вносимое затухание, дБ	<3,2	<5,0	<6,8	<8,6	<10,0
Среднее значение PMD, пс	<0,8	<1,1	<1,4	<1,5	<1,6

В заключение целесообразно провести проверочный расчет затухания, величины энергетического запаса на участках регенерации с учетом конкретного количества строительных длин (стыков) $n_{ст}$, реальных параметров модулей компенсации

$$\begin{cases} A_{yp} = \alpha \cdot L_{yp} + \alpha_k \cdot L_k + 2 \cdot A_{pc} + n_{ст} \cdot A_{nc}; \\ M = A_{max} - A_{yp}. \end{cases} \quad (2.23)$$

2.9. Расчет волоконно-оптической линии связи с использованием оптических усилителей

Расчет выходного сигнала оптического усилителя мощности

Использование оптических усилителей (ОУ) в линейном оптическом тракте позволяет увеличить длину регенерационного участка.

ОУ могут использоваться в качестве:

- усилителя мощности на выходе регенератора;
- предварительного усилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ) и линейного усилителя.

Рассмотрим следующие случаи использования оптических усилителей:

- на выходе регенератора;
- на выходе регенератора с предварительным ОУ на входе ФПУ;
- на выходе регенератора с предварительным ОУ на входе ФПУ и каскадным включением линейных ОУ.

По имеющимся в литературе [22–24] данным выходная мощность насыщения оптических усилителей (ОУ) на основе волоконных световодов, легированных ионами эрбия, лежит в пределах 10–500 мВт (10–27 дБм).

Для уровня спектральной плотности (Вт/Гц) спонтанного излучения на выходе оптического усилителя справедливо [22]:

$$ASE = hv \frac{\eta_{sp}}{\eta} \times (G - 1), \quad (2.24)$$

где $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт с² – постоянная Планка,

$\nu = c / \lambda$ – частота излучения, Гц,

η_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии,

η – квантовая эффективность,

G – коэффициент оптического усиления.

Для идеального оптического усилителя $\eta_{sp}=1$, $\eta=1$, а $G \gg 1$.

В этом случае для спектральной плотности мощности спонтанного излучения на выходе ОУ справедливо

$$ASE_{id} = hvG. \quad (2.25)$$

Для реальных ОУ уровень спонтанного излучения превышает уровень идеального усилителя на величину шум-фактора, который имеет величину NF=5–10 дБ.

Уровень мощности, дБм, спонтанного излучения в полосе частот

$$\Delta \nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (2.26)$$

составляет

$$p_{ASE} = 10 \cdot \lg \left(\frac{ASE_{id} \cdot \Delta\nu}{1 \text{ мВт}} \right) + NF. \quad (2.27)$$

Определим уровень мощности спонтанного излучения на выходе оптического усилителя мощности при следующих исходных данных:

- максимальный уровень выходной мощности $p_{\text{вых max}} = 20$ дБм (100 мВт);
- максимальный уровень входной мощности $p_{\text{вх max}} = -10$ дБм (100 мкВт);
- длина волны источника излучения $\lambda = 1550$ нм;
- ширина спектра усиления $\Delta\lambda = 0,8$ нм;
- коэффициент шума $NF = 6$ дБ.

Результаты расчета:

$\nu = 3 \cdot 10^8 / 1550 \cdot 10^{-9} = 1,93 \cdot 10^{14}$ Гц – частота излучения источника,

$\Delta\nu = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,8 \cdot 10^{-9} / (1,55 \cdot 10^6)^2 = 100 \cdot 10^9$ Гц = 100 ГГц – ширина спектра источника,

$G = 100/0,1 = 1000$,

$ASE_{id} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 1,93 \cdot 10^{14} \cdot 1000 = 1,28 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц = $1,28 \cdot 10^{-13}$ мВт/Гц,

$p_{ASE} = 10 \lg(1,28 \cdot 10^{-13} \cdot 1 \cdot 10^{11} / 1) + 6 = -13$ дБм (0,05 мВт).

В современных скоростных волоконно-оптических системах передачи нормируется, так называемый коэффициент гашения KG, который определяется как отношение оптических мощностей при передаче логических 1 и 0. Обычно коэффициент гашения выражается в логарифмических единицах дБ и лежит в пределах 8–10 дБ. Полагая $KG = 8$ дБ, определим уровни мощности на выходе ОУ при передачах логических 1 и 0: $p_s(1) = 20$ дБм; $p_s(0) = 12$ дБм.

Средний уровень сигнала на выходе усилителя оптической мощности при равной вероятности посылок и пауз составит $p_{s \text{ вых}} = 16$ дБм (39,8 мВт).

Расчет длины регенерационного участка по дисперсии

Учет дисперсии в оптическом волокне и расширения импульсов в ФПУ будем проводить без учета компенсаторов дисперсии. Зададимся равным вкладом в расширение электрического импульса на входе решающего устройства двумя факторами: хроматической дисперсией, АЧХ ФПУ.

Зададимся также величиной отношения длительности такта выбранной ВОСП к ширине электрического импульса на входе решающего устройства $k = 1,3$.

Максимальная длина регенерационного участка по дисперсии может быть определена по формуле

$$l_{pd} = \frac{2\pi c T_0^2}{\lambda^2 D_x \sqrt{1 + 4\pi^2 \Delta\nu^2 T_0^2}}. \quad (2.28)$$

Результаты расчетов для участков регенерации по дисперсии для различных скоростей передачи синхронной цифровой иерархии приведены в табл. 2.5.

При расчетах использованы следующие параметры ВОСП и ОВ:

$\lambda=1550$ нм, $C_T=10^{10}$ бит/с, $k=1,2$, $A=0,1$, $p_e=10^{-10}$, $SN=16,2$, $P_0=10^{-3}$, $D_x=3,5$ пс/(км·нм).

Таблица 2.6

Длины участков регенерации для различных скоростей передачи в синхронной иерархии

Системы передачи		STM-1	STM-4	STM=16	STM-64
C_T , Мбит/с		155	620	2500	10000
T_0 , нс		1,54	0,386	0,096	0,0024
τ_f , нс		1,96	0,49	0,122	0,031
ΔF , МГц		81,2	325	1300	5200
$L_{урд}$, км	$\Delta\nu=100$ ГГц	550	137	34,3	8,58
	$\Delta\nu=10$ ГГц	5500	1370	339	71,7
	$\Delta\nu=1$ ГГц	54700	12700	1780	128

Расчет длины регенерационного участка по затуханию в схеме с усилителем оптической мощности

Определить максимальную длину участка регенерации $l_{ре}$ по затуханию можно по следующему выражению:

$$L_{урд} = \frac{A_{max} - 2 \cdot A_{рс} - A_D - A_{DF} - M}{\alpha + A_{нс} / L_{сд}} \quad (2.29)$$

В табл. 2.7 приведены результаты расчетов длин регенерационных участков для различных скоростей передачи. Там же приведены результаты расчетов максимальной длины регенерационного участка по дисперсии при ширине спектра излучателя $\Delta\nu=1$ ГГц.

Таблица 2.7

Длины участков регенерации по затуханию и дисперсии

Система передачи	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с	0,155	0,62	2,5	10
R_s , Ом	4000	950	240	60
a_{max} , дБ	31,94	28,86	25,83	22,8
$L_{урд}$, км	119,7	104,8	90,8	76,9
$L_{урд}$, км	54700	12700	1780	128

Результаты расчетов справедливы при отсутствии оптических шумов на выходе усилителя оптической мощности. Учет оптических шумов влияет

на результат расчета длины регенерационного участка только по затуханию.

Проведем учет шумов оптического усилителя мощности.

Полагаем, что уровень средней мощности оптического сигнала на входе ФПУ составляет

$$P_{\text{СВХ}} = P_{\text{СВЫХ}} - \alpha L, \quad (2.30)$$

где α – коэффициент затухания оптического волокна, дБ/км,

L – длина оптического волокна, км.

Уровень средней выходной мощности ОУ $P_{\text{СВЫХ}}=16$ дБм, уровень шума на выходе оптического усилителя ($P_{\text{АСЕ}}=-13$ дБм или 0,05 мВт) и требуемое отношение сигнала к шуму $\text{SN}=16,2$ ($Q=12$ дБ).

Определим уровень суммарного шума на входе решающего устройства в зависимости от затухания на участке регенерации, обусловленный спонтанным излучением ОУ и шумами ФПУ:

$$P_{\text{нО}} = P_{\text{н}}(a_p) + P_{\text{порт}} 10^{-\frac{a_p}{10}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu}}. \quad (2.31)$$

Множитель, содержащий отношение полосы частот ФПУ ΔF и ширины спектра излучения источника $\Delta \nu$, учитывает подавление оптических шумов в ФПУ. Отметим, что пороговая мощность ФПУ $P_{\text{н}}$ также зависит от длины регенерационного участка $L_{\text{ру}}$.

Максимальное затухание в линейном тракте можно найти, решив следующее трансцендентное уравнение:

$$\text{SN}_{\text{min}} \cdot \left[P_{\text{н}}(a_p) + P_{\text{порт}} 10^{-\frac{a_p}{10}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu}} \right] = P_0 \cdot 10^{-\frac{a_p}{10}}. \quad (2.32)$$

Расчеты показывают, что результаты практически не изменились и в этом случае остаются справедливыми данные табл. 2.7.

2.10. Определение длины регенерационного участка по затуханию с усилителем оптической мощности и оптическим предусилителем перед фотоприемником

Оптический предусилитель работает в режиме малого сигнала и, следовательно, с максимальным усилением. Примем усилительную способность предварительного ОУ $g_{\text{пр}}=40$ дБ и коэффициент шума $\text{NF}=6$ дБ.

Запишем выражения для оптического сигнала и шума на входе ФПУ:

$$P_{\text{СВХ}} = P_{\text{СВЫХ}} - a_p + g_{\text{пр}}, \quad P_{\text{АСЕВХ}} = P_{\text{АСЕ}} - a_p + g_{\text{пр}} + \text{NF}. \quad (2.33)$$

Определим уровень суммарного шума на входе РУ, который обусловлен спонтанным излучением двух ОУ и шумами ФПУ:

$$P_{nO} = P_n(a_p) + 10^{-3} \cdot 10 \frac{P_{ASEВх} - a_p + g_{np} + NF}{10} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu}}. \quad (2.34)$$

Максимальное затухание в линейном тракте можно найти, решив следующее трансцендентное уравнение:

$$SN_{\min} \left[P_n(a_p) + 10^{-3} \cdot 10 \frac{P_{ASEВх} - a_p + g_{np} + NF}{10} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu}} \right] = P_0 \cdot 10^{\frac{a_p - g_{np}}{10}}. \quad (2.35)$$

Результаты расчетов длины участка регенерации при максимальном затухании для различных систем передачи приведены в табл. 2.8. Там же приведены результаты расчетов длины регенерационного участка по затуханию от величины фототока. Последняя величина определялась, для того чтобы убедиться, что фотоприемник не входит в насыщение.

Таблица 2.8

Длины участков регенерации при максимальном затухании

Система передачи	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с	0,155	0,62	2,5	10
R, Ом	3500	900	200	60
A _{max} , дБ	75,5	72,5	69,5	66,3
L _{ур} , км	320	306	292	274
I _ф , мА	0,026	0,05	0,1	0,2

Для всех систем передачи использовался р-і-п фотодиод (M=1), который обеспечивал большее значение длины регенерационного участка.

2.11. Определение длины регенерационного участка по затуханию с каскадным включением оптических усилителей и оптическим предусилителем перед фотоприемником

Очевидно, ВОЛС можно построить из k-1 одинаковых усилительных участков с затуханием, равным усилительной способности ОУ, которая лежит в пределах 30–40 дБ. Длину последнего усилительного участка, можно определить по методике, приведенной в предыдущем разделе.

Полагаем, что усилительная способность первых ОУ g=38 дБ, тогда максимальное затухание на усилительном участке составит αL=g_{np}-M=35 дБ.

При среднем затухании оптического волокна $\alpha=0,22$ дБ/км на длине волны $\lambda=1550$ нм максимальная длина усилительного участка составит $L_{yp}=35/0,22=159$ км.

Определим параметры оптического сигнала и шума на выходе ОУ и соответственно на входе следующего усилительного участка:

$$P_{SBX} = P_{SBYX} - \alpha l + g_{np}, P_{ASEBX} = P_{ASE} - \alpha l + g_{np} + (k-1) NF, \quad (2.36)$$

где k – номер ОУ.

Определим максимально возможное количество усилительных участков между двумя регенераторами, исходя из допустимого отношения сигнала к шуму $Q=12$ дБ:

$$k = \text{INT} \left(1 + \frac{P_{SBYX} - P_{ASE} - Q}{NF} \right). \quad (2.37)$$

Для уже выбранных параметров $k=4$ и отношения сигнал/шум на выходе 3-го усилителя $Q=15$ дБ.

Проведем расчет длины 4-го усилительного участка по уравнению

$$SN_{\min} \left[P_n(a_p) + 10^{-3} \cdot 10^{\frac{P_{ASEBX} - a_p + g_{np} + (k-1) \cdot NF}{10}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu}} \right] = P_0 \times 10^{\frac{a_p - g_{np}}{10}}. \quad (2.38)$$

В табл. 2.9 приведены результаты расчетов максимальных длин регенерационных участков по затуханию. Там же приведены максимальные длины регенерационных участков по дисперсии.

Таблица 2.9

Длины участков регенерации по затуханию и дисперсии

Система передачи		STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с		0,155	0,62	2,5	10
L_{py} , км		790	780	760	750
L_{pyd} , км	$\Delta \nu=100$ ГГц	550	137	34,3	8,58
	$\Delta \nu=10$ ГГц	5500	1370	339	71,7
	$\Delta \nu=1$ ГГц	54700	12700	1780	128

Последняя таблица позволяет выбрать наиболее подходящий источник излучения для данной скорости передачи.

ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОЛС

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) занимают в настоящее время лидирующее место по развитию и строительству, что объясняется огромной пропускной способностью, большими длинами участков регенерации, более низкими эксплуатационными расходами.

В отличие от металлических кабелей способов строительства ВОЛС значительно больше, что обеспечивает возможность их выбора в зависимости от региона, климатических условий, требований к надежности ВОЛС, предполагаемых затрат на строительство и ряда других факторов.

Прежде всего, традиционные способы прокладки волоконно-оптического кабеля (ВОК) в грунт, где тоже возникают, как минимум, три варианта.

3.1. Прокладка кабеля непосредственно в грунт

Характеризуется определенными требованиями к конструкции самого ВОК. Прежде всего это наличие бронепокровов (рис. 3.1) того или иного вида, необходимых для защиты сердечника ВОК от различного рода механических повреждений при давлении грунта.



Кабель типа ОКЛ



Кабель типа ОКБ

Рис. 3.1. ВОК для прокладки непосредственно в грунт

Прокладка осуществляется практически так же как и металлических кабелей, единственно необходимо контролировать усилие тяжения. Стоимость такого типа ВОК лежит от 2800 до 3600 \$/км.

Скорость строительства зависит только от типа грунта, в среднем 1,0–1,5 км в смену.

Факторы, которые определяют надежность построенной таким способом ВОЛС, обусловлены качеством подготовки траншеи (наличием изгибов, камней и других неоднородностей), воздействием атмосферного электричества, так как кабель имеет металлические покрытия, коррозия, механические повреждения сторонними организациями.

Более подробно [23, 24]. В результате, ВОЛС может эксплуатироваться весь нормативный срок службы – 25 лет при надлежащем выполнении ремонтно-восстановительных работ.

Прокладка ВОК в защитную трубу

Предварительно прокладывается в грунт защитная силиконовая труба (рис. 3.2) [24–26], а затем в нее пневмоспособом задувается ВОК. При укладке кабелей в трубопроводах повышается степень защиты последних от вибрационных воздействий и механических напряжений, возникающих в результате деформации грунта или протекания мерзлотно-грунтовых процессов (морозного пучения, перемещения грунта при оттаивании, морозобойных трещин и др.). ВОЛС становится полностью диэлектрической, так как требования к механическим характеристикам ВОК ниже и необходимость применения бронепокровов отпадает, поэтому кабель (рис. 3.3) становится дешевле.



Рис. 3.2. Защитные трубопроводы

Прокладка трубопровода осуществляется также кабелеукладчиком в траншею.

Надежность подобного типа ВОЛС выше, за счет отсутствия воздействия некоторых из перечисленных выше факторов. Современное оборудование для задувки кабеля (рис. 3.4) обеспечивает скорость задува 60–80 м/мин, что позволяет существенно увеличить скорость строительства ВОЛС и обеспечить ее высокую ремонтнопригодность [25–28].

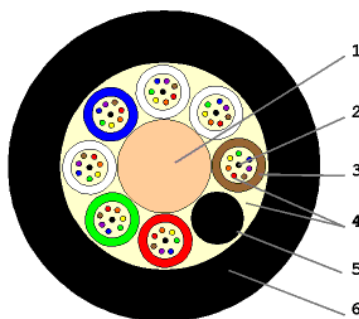


Рис. 3.3. ВОК для пневмопрокладки:

- 1 – центральный силовой элемент: диэлектрический (ДПО) или стальной (СПО);
- 2 – оптическое волокно (от 2 до 12 в каждом модуле);
- 3 – оптический модуль (от 1-го до 12-ти)
- 4 – гидрофобный наполнитель;
- 5 – кордель;
- 6 – полиэтиленовая оболочка

Оптические кабели или трубы прокладывают непосредственно в грунт (рис. 3.5).



Рис. 3.4. Инжектор ПСИ-1 для задувки кабеля

Прокладка ВОК в кабельную канализацию

Этот способ применяется, как правило, в населенных пунктах. Его реализация осуществляется либо прокладкой бронированного кабеля непосредственно в асбоцементный канал кабельной канали-



Рис. 3.5. Прокладка труб (кабеля) непосредственно в грунт



зации, либо сначала затаскивают в канал полиэтиленовую трубу, а затем в нее ВОК более простой конструкции и, соответственно, более дешевой.

Кабельная канализация (КК) – совокупность трубопроводов и смотровых устройств для прокладки, монтажа и эксплуатационного обслуживания кабелей [28, 30]. Разновидностью КК являются закладные устройства скрытой проводки внутри зданий. В общую систему КК включаются шахты (в подвальной части зданий) станции-онных со-

оружений электросвязи, коллекторы и тоннели, внутри которых кабели прокладываются открыто, без труб по специально поддерживающим конструк-

циям. Подземная КК с длиной пролетов между смотровыми устройствами до 125 м сооружается из одиночных или сблокированных в пакеты труб, прокладываемых в земле, преимущественно в пешеходной части улиц на глубине от 0,4 до 1,8 м.



Рис. 3.6. Кабельная канализация и ее повреждения

Применяются бетонные, керамические, асбестоцементные, полиэтиленовые, поливинилхлоридные, пековолокнистые и др. трубы, преимущественно с внутренним диаметром 100 мм (ограниченно от 55 до 90 мм) и длиной от 1 до 6 м.

Соединение труб каждого вида осуществляется так, чтобы обеспечивались минимальная водопроницаемость и достаточная механическая прочность. Для стока попадающей в каналы воды трубы и блоки КК прокладываются с уклоном от одного смотрового устройства к соседнему или от середины пролета в обе стороны к каждому смотровому устройству – статья из БСЭ.

В городской черте для прокладки оптических кабелей, как правило, используется имеющаяся инфраструктура: кабельная канализация, коллекторы, туннели.

При прокладке оптического кабеля в кабельную канализацию наиболее широко используется метод затягивания кабеля с помощью лебедки, снабженной устройством ограничения тягового усилия.

При этом не должны превышать нормируемые нормативно-технической документацией механические воздействия на кабель, в первую очередь, усилия растяжения и сжатия, климатические условия (нижняя предельная температура прокладки, как правило, составляет -10°C), допустимые радиусы изгиба кабеля (радиус изгиба не должен быть менее 20 наружных диаметров).

Используемое при строительстве специальное технологическое оборудо-

дование:

- лебедка и кабельный домкрат;
- устройство заготовки каналов (УЗК);
- трубы для ввода кабеля через люк колодца в канал кабельной канализации;
- люкооггибающие ролики для прохождения кабеля через люк колодца;
- горизонтальные распорки и кабельные блоки для плавных поворотов кабеля в угловых колодцах;
- разрезные направляющие воронки;
- кабельный наконечник с чулком для натяжения кабеля;
- компенсатор вращения – вертлюг;
- динамометр.

3.2. Организация переходов через различные преграды

Безусловно, основным методом для организации кабельных переходов через различного рода коммуникации, дороги, реки, озера или просто неудобные места является горизонтально (вертикально) направленное бурение. Оно организуется посредством специальных машин и механизмов, отвечающих конкретным условиям прокладки кабеля (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Схема организации перехода через автодорогу

Реально это выглядит достаточно сложно и требует специальных решений по размещению оборудования, его обслуживанию и пр. (рис. 3.8, 3.9), но достоинства неоспоримы [31, 32].



Рис. 3.8. Машина для горизонтально-направленного бурения



Рис. 3.9. Площадка, где размещается оборудование для горизонтально-направленного бурения



Рис. 3.10. Машина в действии

Метод горизонтально-направленного бурения является альтернативной традиционному траншейному методу и позволяет преодолевать преграды, встречающиеся на пути линейной части трубопроводов (реки, дамбы, дороги, железнодорожные насыпи и т.д.), без нарушения режима их функционирования (рис. 3.10).

При определении экономической выгоды неправомерно простое сравнение ориентировочной стоимости метода горизонтально-направленного бурения с ориентировочной стоимостью траншейного метода. Технология горизонтально-направленного бурения не является дешевой. Хотя денежные, и особенно временные затраты значительно экономятся на стадии строительства, основная экономия от применения метода лежит в долгосрочной перспективе, в чем позволяет убедиться сравнительный анализ двух методов строительства трубопроводов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Сравнение методов прокладки трубопроводов наружных инженерных сетей

Траншейный метод	Горизонтально-направленное бурение
Объем работ, финансы, сроки	
Большой объем земляных работ, с привлечением тяжелой техники и рабочей силы	Один буровой комплекс и две бригады рабочих
Значительные финансовые затраты	Сокращение финансовых затрат до 30% за счет сокращения сроков производства работ
Длительные сроки строительства	Сокращение сроков строительства от 2 до 20 раз
Дополнительные расходы	
Затраты на ликвидацию аварий и их последствий	Риск возникновения аварийных ситуаций сведен к нулю
Эксплуатационные расходы на контроль и ремонт	Гарантия длительной сохранности трубопровода. Отсутствие эксплуатационных расходов
Строительство резервной нитки трубопровода	Возможность отказа от резервной нитки трубопровода
Экология и человек	
Наносится невосполнимый ущерб природе	Нетронутые экология и ландшафт
Зависимость от периода навигации.	Не прерывается судоходство, движение

Нарушение режима движения транспорта	автомобильного и жд транспорта
Нарушение дорожного покрытия. Нарушение нормального ритма жизни людей	Остается нетронутым дорожное покрытие. Не причиняет неудобств людям
Длительный период на подготовку и подтверждение пакета согласительных документов с природоохранными организациями	Минимум согласований с природоохранными организациями

3.3. Оптические кабели на «последней миле»

Технология пневмопрокладки – новый взгляд на кабельную канализацию

Особенностью технологии пневмопрокладки является поэтапное строительство волоконно-оптической кабельной системы [29, 30]. На первом этапе строится собственно кабельная канализация, представляющая собой кабель, объединяющий каналы – одну или множество пустых (без волокон) трубок, микротрубок в технологии Prysmian. На втором этапе в кабельные каналы кабельной канализации прокладываются ОК – в микротрубки вдуваются специальные волоконные модули.

Ключевой отличительной чертой технологии Prysmian от других технологий пневмопрокладки является использование в качестве каналов кабельной канализации трубок минимального диаметра. Сравнение системы Sirosso с типовым традиционным решением, когда армированный ОК с 8–16 волокнами затягивается в асбестоцементную трубу диаметром 100 мм (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Сравнение системы Sirosso с типовыми решениями

Элементы и параметры системы	Система Sirosso	Традиционное решение
Кабельная канализация	Кабель из микротрубок	Совокупность асбестоцементных труб
Кабельный канал (внешний/внутренний диаметр), мм	Микротрубка 5/3,5	Асбестоцементная трубка 118/100
Оптический кабель, диаметр, мм	Волоконный модуль – 1,3 (12 волокон)	Армированный ОК – 15
Число волокон ОК	От 2 до 288	8, 16, 24, 32, 48 и более
Способ ответвления	Муфта	Колодцы
Диаметр системы, мм	39 (24 трубки)	300 (4 канала)

Подобного типа микротрубки эффективно используются в структуре PON, особенно на этапе прокладки оптического кабеля в домах и квартирах.

В распределительных сетях важен способ ответвления волокон от кабельной канализации к абоненту. В традиционной технологии для ответвления несколько волокон от ОК требуется колодец или уличный шкаф и сварочная муфта. При этом, даже если нужно ответвить 2 волокна, разрезаются все волокна в пределах модуля ОК (8 или 12) и затем перевариваются в муфте с учетом ответвлений.

В системе Siроссо при монтаже ответвляются не волокна, а трубки без волокон. Волокно вдвигается только после того, как полностью проложен ответвленный кабель с трубкой до абонента. Заметим, что в других трубках магистрали при этом могут находиться волокна. Все трубки, которые не ответвляются, не подвергаются вскрытию.

Кабели с микротрубками

Предназначены, прежде всего, для прокладки в кабель-каналах зданий вертикальной и горизонтальной подсистем (рис. 3.11). Кабели бывают на 1, 2, 4, 7, 12, 19 и 24 трубки. Трубки все одинакового размера, внешний диаметр 5 мм, внутренний 3,5 мм.

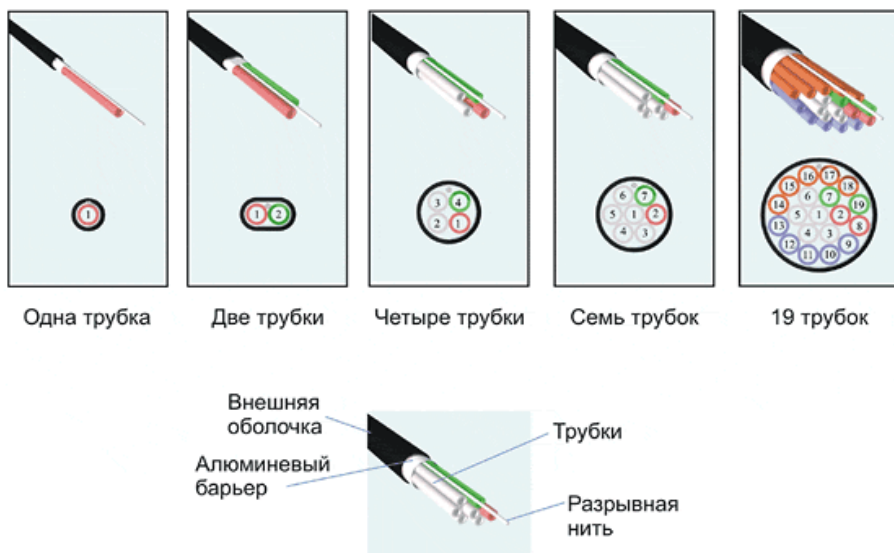


Рис. 3.11. Варианты исполнения кабелей с микротрубками

Кабели поставляются в разном исполнении:

- с одной оболочкой полиэтилена, для прокладки в существующих полиэтиленовых трубах кабельной канализации, но не в асбестоцементных;

- с двумя оболочками, что дает достаточно хорошую защиту, для прокладки в асбестоцементные каналы и непосредственно в грунт;
- в исполнении с армированной стальной гофролентой.

В каждом случае трубки отделяются от полиэтиленового слоя водоблокирующей алюминиевой лентой, она же является и технологической. Кабели для прокладки внутри зданий, не содержат галогена в своей оболочке. Все кабели легко разделяются, на них можно выполнить продольные и поперечные разрезы, чтобы снять внешние оболочки кабеля и добраться до трубок.

Волоконные модули

В микротрубки укладываются так называемые волоконные модули. Модули бывают на 2, 4, 8 и 12 волокон (рис. 3.12), характеристики модулей приведены в табл. 3.3.

Все волоконные модули за исключением модуля на 12 волокон имеют поверхностные неоднородности, которые способствуют формированию турбулентности воздушного потока при задувке и более сильному увлечению модуля потоком.

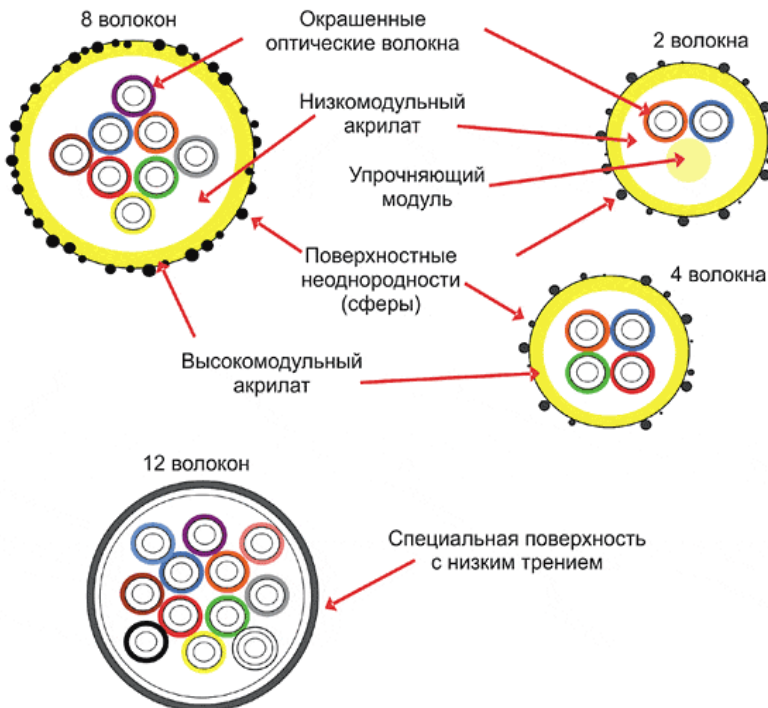


Рис. 3.12. Варианты исполнения оптических модулей

Характеристики оптических модулей для задувки

Параметр	Число волокон			
	2	4	8	12
Диаметр, мм	1	1,2	1,4	1,8
Вес, г/м	0,8	1,0	1,5	1,7
Длина задувки, м	1000			
Возможные типы волокон	SM, MM50/125, MM62,5/125, OM3, SSF и др.			

Задувка

В одну трубку может задуваться только один волоконный модуль. Таким образом, максимальное число волокон в одном кабеле равно 288 (24×12).

Укладка волоконного модуля в микротрубку происходит благодаря воздушному потоку, который воздействует на модуль и увлекает его за собой. Воздушный поток формируется путем подачи воздуха высокого давления с той же стороны, с которой подается в трубку волокно. Эту задачу выполняет небольшая машинка – «задувная головка» (рис. 3.13), которая подключается к компрессору, подающему сжатый воздух, и к источнику питания. В нее также заводится волоконный модуль. Задувная головка подключается к трубке, в которую необходимо уложить модуль. В процессе задувки задувная головка, с одной стороны, толкает волоконный модуль в трубку, с другой стороны, помогает ему перемещаться внутри трубки с помощью подачи сжатого воздуха, который оказывает распределенное воздействие на волоконный модуль. Характерная скорость задувки составляет 30 м/мин.



Рис. 3.13. Задувная головка

В трубку на эту длину, называемую «мертвой зоной», осуществляется путем механического проталкивания со стороны вдвунной головки. После преодоления

Следует отметить, что на начальной стадии процесса задувки, пока в трубке недостаточно волокна, поток воздуха еще не обеспечивает увлечения волокна за собой. Подача волоконного модуля в

«мертвой зоны» волоконный модуль начинает увлекаться воздушным потоком.

Таким образом можно уложить до 1 км в одну сторону. Катушка, на которую первоначально намотан волоконный модуль, допускает его разматывание с каждой из сторон. Поэтому можно построить участок протяженностью 2 км с одной строительной длиной, если задувку вести от средней точки. При необходимости можно задувать и большую длину. Для этого после прохождения 1 км следует собирать волокно в специальную канистру (Pan) для хранения волокна, а затем опять вдуть его еще на 1 км. Теоретически можно вдуть любую длину. Но поскольку процедура с последовательным перевдвухиванием волокна достаточно утомительна, рекомендуется ограничиваться строительными длинами 1–2 км. С этой точки зрения задувка оптимально подходит для решений последней мили, где расстояния преимущественно невелики.

3.3. Воздушные способы строительства ВОЛС

В отличие от строительства металлических линий, которые очень сложно подвесить, широкое распространение получили различные варианты воздушного способа строительства ВОЛС [31–37].

Эти способы обладают целым рядом неоспоримых преимуществ перед подземными и заключаются в следующем, – нет необходимости в землеотводе, нет необходимости копать землю. В результате стоимость строительства в 2 и более раз ниже, а скорость строительства в несколько раз выше, что обусловлено, прежде всего, возможностью «привязать» конструкцию ВОК к тому или иному варианту.

В качестве опор, которые могут быть использованы для строительства воздушных ВОЛС, рассматриваются следующие:

- опоры магистральных линий электропередачи (ЛЭП) с напряжением от 35 кВ и выше;
- опоры распределительных ЛЭП, например до 10 кВ, которые, между прочим, подходят почти к каждому населенному пункту;
- опоры контактных сетей электрофицированных железных дорог (ЭЖД);
- опоры воздушных линий связи (если они в нормальном состоянии).

Реализация подобного типа ВОЛС может быть выполнена разнообразными способами, которые имеют свои преимущества и недостатки.

Подвеска ВОК

Самый простой способ, который с успехом применялся и при строительстве металлических линий связи простейших вариантов. Наиболее широ-

ко распространенный вариант для ВОЛС это использование кабеля типа 8 (рис. 3.14).

Оптические модули изготовлены на основе полибутилентерефталата (ПБТ) производства фирмы EMS Chemie AG (Швейцария) или фирмы BASF (Германия).

Недостатки этого способа – высокая парусность ВОЛС, что приводит к сильной вибрации, в результате происходит отрыв троса от сердечника ВОК; обледенение кабеля в зимний период и обрыв линии; невозможность

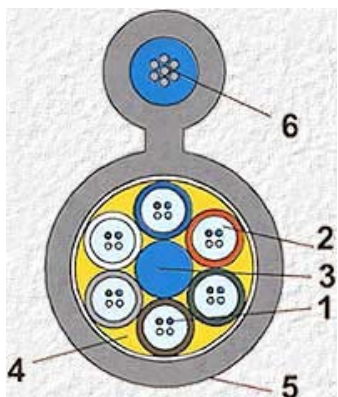


Рис. 3.14. Конструкция ВОК типа «восьмерка»:

- 1 – оптическое волокно M.10/125.04.UV производства фирмы Fujikura (Япония),
- 2,4 – гидрофобные заполнители Naptel 851 и Naptel OP308 фирм British Petroleum (Великобритания),
- 3 – центральный силовой элемент: стеклопластиковый пруток фирмы Cousin (Франция),
- 5 – внешняя оболочка изготавливается из полиэтилена Borealis (Финляндия),
- 6 – внешний силовой элемент: стальной трос

подвески в условиях высоких напряженностей электрического поля (особенно переменного) в связи с протеканием по тросу достаточно мощных наведенных вихревых токов; воздействие солнечной радиации и прочих атмосферных факторов, приводящих к коррозии внешней влагозащитной оболочки ВОК (рис. 3.15).

Все это приводит к тому, что срок службы подобного типа линий не превышает 17–18 лет. Однако здесь используется самый дешевый кабель (в районе 1800–2400 \$/км) и скорость строительства высока до 5–6 км в смену.

ВОК в грозозащитном тросе

Один из самых дорогих вариантов строительства ВОЛС (рис. 3.16). Сам кабель очень дорогой, так как содержит достаточно много упрочняющих



Рис. 3.15. Подвеска ВОК типа «восьмерка»

элементов, сердечник кабеля модульный или трубчатый, защищен дополнительной алюми-ниеовой оболочкой и размещается между проволоками грозотроса. Эти проволоки выполняются из специального материала, обеспечивающего высокую проводимость (для случая протекания токов разряда молнии) и высокую прочность. Его стоимость лежит в пределах 5000–7000 \$/км.

Кабель предназначен для подвески на опорах воздушных линий электропередач от 35 кВ и выше.

Заземляющий провод, имеющий один или два слоя проволок из ASC, содержащий оптический сердечник, монтируется наверху ЛЭП и несет двойную функцию грозотроса и кабеля связи. Процесс строительства таких ВОЛС – сложная техническая задача, связанная с применением мощных натяжных механизмов, а скорость строительства и технология замены существующего троса на волоконно-оптический в очень сильной степени зависит от профиля ЛЭП, т. е. местности, по которой она проходит (рис. 3.17).



Количество оптических волокон, шт.	Коэффициент затухания, дБ/км		Допустимое растягивающее усилие, кН	Температурный диапазон, °С	Диаметр по обол., мм	Масса кабеля, кг/км
	одномод.	многомод.				
	1550 нм	1310 нм				
2–288	< 0,22	< 0,7	от 80	–60...+80	от 13,9	от 627

Рис. 3.16. Конструкция, внешний вид и некоторые характеристики ВОК в грозотросе

Высокая надежность ВОЛС, реализованных на базе грозозащитного троса, объясняется тем, что несущие конструкции ЛЭП рассчитаны на длительный срок службы (до 50 лет) и выдерживают внешние разрушающие нагрузки, вплоть до ураганных. Кроме того, вряд ли возможны механические повреждения ВОЛС, расположенной на высоте 10-этажного дома в очень прочной металлической оболочке. Этим объясняется их строительство в труднодоступных регионах, которых в нашей стране предостаточно.



Рис. 3.17. Прокладка ОК в грозозащитном тросе

ВОЛС на основе самонесущего ВОК

Способ строительства нашел наиболее широкое распространение там, где длина пролетов невелика. Контактные сети ЭЖД ($L_{\text{прол}} \approx 70$ м), распределительные сети ЛЭП ($L_{\text{прол}} = 50-70$ м), опоры ВЛС ($L_{\text{прол}} = 50-70$ м).

Этот фактор обусловлен тем обстоятельством, что при увеличении длины пролета требуется, увеличение механических характеристик ВОК, таких как длительно допустимого растягивающего усилия, прочности на разрыв и пр., что неизбежно ведет к увеличению количества армирующих элементов в конструкции сердечника и веса ВОК, что, в свою очередь, увели-

чивает вес кабеля в пролете и вызывает дальнейшую необходимость роста его механических параметров ВОК (рис. 3.18). Вот здесь, должен быть найден компромисс (решены вопросы оптимизации конструкции ВОК и длин пролетов, на которых он может быть использован).

Технология строительства достаточно проста, но ее реализация требует некоторых специальных механизмов решения вопросов крепления ВОК к опорам, установки муфт и элементов спуска кабеля в грунт (рис. 3.19).

Скорость строительства очень высока. Можно за одну смену подвесить одну или две строительных длины кабеля.

Стоимость кабеля также не очень велика и составляет в среднем для легких вариантов строительства от 2800 до 3600 \$/км.

Построив таким образом ВОЛС (рис. 3.20), необходимо задуматься, сколько она простоит и что нужно делать,

чтобы она стояла дольше? ВОЛС на основе самонесущего кабеля подвергает-



Рис. 3.18. Основные типы самонесущих ВОК



Рис. 3.19. Натяжная и тормозная машина для самонесущего ВОК

ся самым разнообразным воздействиям, прежде всего – это атмосферные факторы, ветровые нагрузки, солнечная радиация, осадки, обледенение,



Рис. 3.20. Монтаж самонесущего ВОК

механические повреждения, вызванные ремонтными работами на других проводах, или хищения кабеля. Более того, если кабель висит в электрическом поле (что происходит повсеместно), то в результате воздействия солнечной радиации на поверхности внешней влагозащитной оболочки кабеля начинают

возникать микротрещины, в которых накапливается грязь, влага и начинает развиваться трекинг-процесс – протекание поверхностных токов – треков. С течением времени плотность этих токов растет, и кабель постепенно начинает гореть. Особенно это проявляется в местах крепления кабеля к опорам, так как в пролете кабель не заземлен и образуется достаточно высокая плотность треков, а на опоре кабель заземлен и поверхностные токи, естественно, стекают по опоре. Единственная рекомендация, обеспечивающая снижение влияния данного фактора, – применение трекинг-эрозионностойкой влагозащитной оболочки на основе фторполимерных материалов.

В результате срок службы ВОЛС на основе самонесущих ВОК не превышает 18 – 20 лет.

Навивная технология строительства ВОЛС

Одна из наиболее интересных как с точки зрения технической реализации, так и возможностей прокладки кабеля.

Достоинства навивной технологии неоспоримы. Прежде всего, это возможность строить ВОЛС практически в любых условиях как на пересеченной местности – горы, тундра, тайга, т. е. там, где построены ЛЭП, так и при наличии различных промышленных преград – железные и автомобильные дороги, фидерные линии различного назначения, дома, огороды, овраги и т.п. без дополнительных приспособлений и помостов.

Вторым важным фактором является то, что подобного типа линия не требует большого числа дополнительных элементов крепления, а использует мощные несущие конструкции существующих линий электропередач (грозозащитный трос, фазовые провода), которые и обеспечивают должную механическую защиту ВОЛС.

Кабель для накрутки на провода – один из самых дешевых, так как не требует дополнительных элементов жесткости. Единственное требование – высокая трекинг-эрозийная стойкость внешней влагозащитной оболочки, поскольку кабель, как правило, висит в мощном электрическом поле (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Навивные волоконно-оптические кабели: ДПО, ДВО

Реализация навивной технологии осуществляется с применением специальной навивочной машины, которая и осуществляет накрутку легкого, полностью диэлектрического ВОК на несущие элементы.

Впервые реализация этой технологии была осуществлена в Японии в начале 80-х годов прошлого века, затем она переместилась в Европу и США. Этой технологией занимались такие известные фирмы, как «FOKAS», корпорация «BICCCABLES».

В России это технология появилась в начале 90-х годов прошлого века, прежде всего в таких известных организациях как ЕЭС РОССИИ, ОРГТРЕС, в распоряжении которых находились магистральные ЛЭП. Опыт строительства ВОЛС с использованием навивной технологии практически полностью копировал разработки западных фирм.

Навивочная машина европейского производства представляет из себя некоторую тележку, которая перемещается по несущему тросу (рис. 3.22.). На эту тележку крепится барабан со строительной длиной ВОК, причем ось барабана перпендикулярна оси несущего троса. При перемещении тележки вдоль несущего



Рис. 3.22. Реализация навивочных машин

троса одновременно осуществляется ее вращение вокруг оси троса и сматывание ВОК на трос. С противоположной относительно барабана стороны установлен противовес, который автоматически перемещается к оси вращения, компенсируя вес сматываемого кабеля.

Основными недостатками подобной реализации являются:

- ограничение по полезной нагрузке (невозможно повесить на машину, например, 6 км кабеля);
- невозможность преодолеть неоднородности провода, на который накручивается кабель, из-за плотной привязки роликов машины к шагу повива троса.

Вторым вариантом, основанным на том же принципе, но позволяет увеличить полезную нагрузку, которую несет навивочная машина, предложен нашими энергетиками. В нем вместо противовеса устанавливается второй барабан с кабелем и на несущий трос наматываются вместо одного одновременно два кабеля (рис. 3.23). Эти варианты имеют два существенных недостатка. В первом случае полезный вес кабельной нагрузки практически в 2 раза меньше за счет наличия противовеса. Во втором необходимо навивать два кабеля, что не всегда является необходимым.

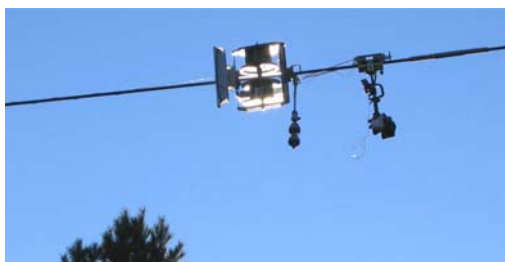


Рис. 3.23. Навивочная машина с двумя кабельными барабанами

Другой недостаток состоит в том, что все провода (грозозащитный трос, фазовые провода) имеют конечную длину. При строительстве ВОЛС строительные длины проводов соединяют специальными элементами достаточно больших габаритных размеров, через которые навивочные машины, реализованные по этому принципу,

не передут, так как их вращение обеспечивается за счет плотного прилегания к тросу и отслеживания его шага скрутки. Можно представить себе картину, когда подобный элемент находится над серединой широкой реки, через которую переброшена ЛЭП, подъехав к нему, машина остановится и возникнет проблема ее освобождения. Кроме того, в процессе эксплуатации ЛЭП возникают повреждения (обрыв) проволок троса, энергетики делают бандажи, чтобы трос дальше не распускался. Это тоже вызывает остановку машины.

Вариантом, свободным от перечисленных недостатков, является способ навивки кабеля на провод, предложенный специалистами СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича и Ставропольэнерго, получивший авторское свидетельство и патент (рис. 3.24). Этот способ принципиально отличается от предыдущих тем, что барабан с кабелем располагается не перпендикулярно

оси провода, а соостно, и в навивочной машине используется принцип веретена или безынерционной спиннинговой катушки. Навивочная машина имеет два барабана: один рабочий, другой базовый. На рабочем барабане размещается длина кабеля,

соответствующая длине пролета, на который он должен быть навит. Вся строительная длина ВОК находится на базовом барабане и, постепенно, по мере прохождения пролетов, сматывается на рабочий барабан. Сматывание кабеля и его укладка на провод осуществляется с помощью водила

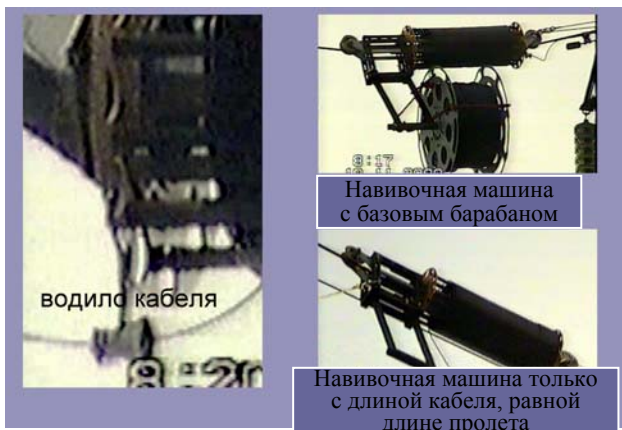


Рис. 3.24. Навивочная машина с соосным размещением рабочего барабана с кабелем

(рис. 3.24). Основные достоинства такого способа состоят в том, что здесь ничего не крутится (кроме водила), которое сбрасывает витки кабеля на провод. Рабочий барабан зафиксирован на тележке, базовый барабан может располагаться как на кронштейне тележки, так и на земле (в кузове автомашины, следующей за перемещением тележки). Ограничения на протяженность строительной длины в этом случае полностью снимаются, а вес машины с кабелем минимизирован – вес кабеля на длине пролета в среднем 4–6 кг, а вес машины не более 15 кг (без базового барабана). Этот принцип реализации навивочной машины независим от шага скрутки троса, поэтому ролики, которые обеспечивают перемещение машины вдоль троса, могут быть выполнены в произвольной форме, обеспечивающей свободное перемещение тележки через любые неоднородности проводов, на которые навивается ВОК.

Первые опыты реализации данной технологии относятся к началу 90-х годов прошлого века. В дальнейшем построено около 80 км ВОЛС на ЛЭП с напряжением 35 и 110 кВ как в интересах РАО ЕЭС России, так и Академии наук России.

Приведенные выше примеры современного строительства ВОЛС можно представить на рис. 3.25, дающей достаточно полное представление о достоинствах и недостатках тех или иных способов.

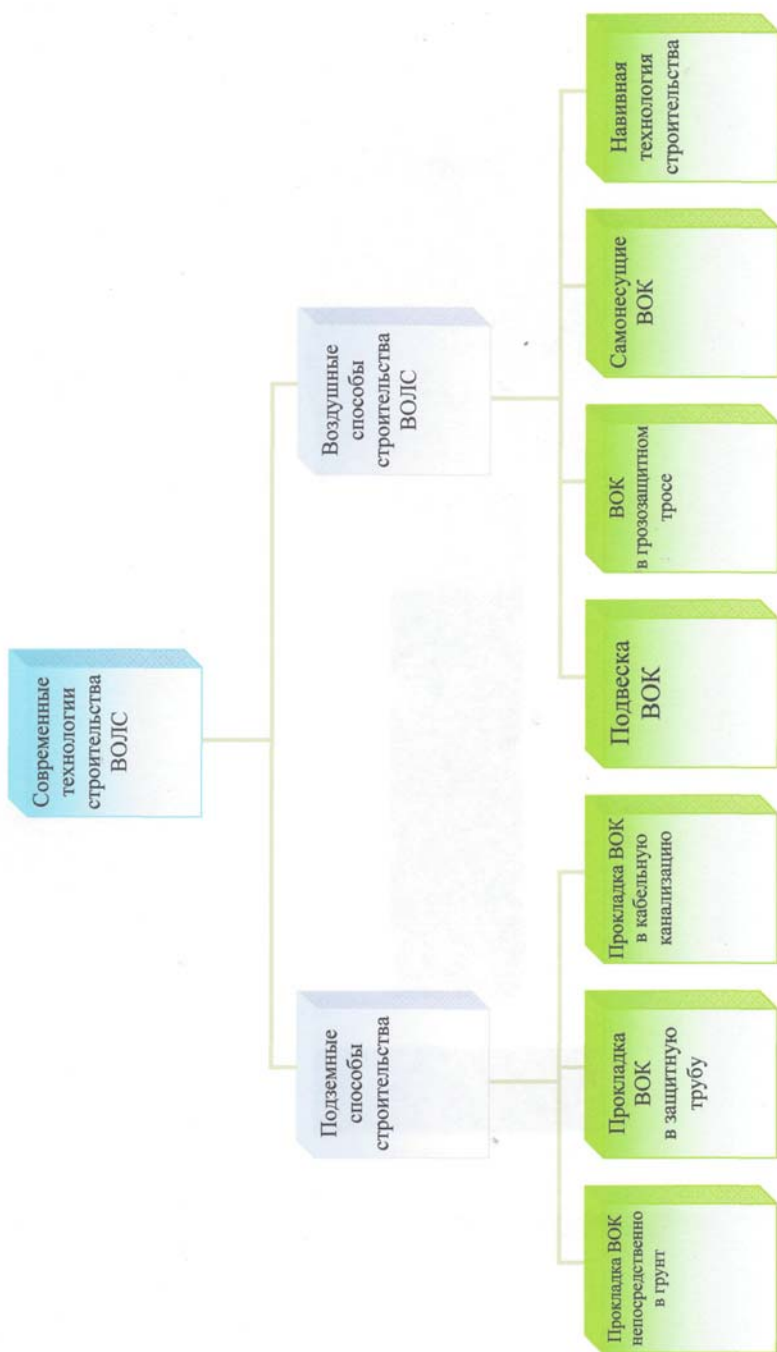


Рис. 3.25. Современные технологии строительства ВОЛС

	Прокладка ВОК в грунт	Прокладка ВОК в трубу	Прокладка ВОК в каб. кан.	Подвеска ВОК	ВОК в грозотросе	Само-несущие ВОК	Навигная технология
Конструкция и стоимость ВОК	Бронированный 2,8 – 3,6 т. \$/км	Без брони 2,4 – 3,2 т. \$/км	Оба варианта	Типа 8-ки с тросом 2,0-2,6 т. \$/км	Внутри грозотроса 6,0-8,0 \$/км	Дизель-трисекский 3,4-4,2 т. \$/км	Легкий 2,0-2,5 \$/км
Скорость работ при прокладке, км/смена	1,0-1,5 км, в зависимости от типа грунта и возможности использования механизмов			До 4 км в смену	До 4 км в смену	До 5-6 км в смену	До 3-5 км в смену
Подверженность линии внешним влияниям	Механизмы, лебедки, насосы кабелеукладчик, трубы для переходов, инструмент для работы в поле	Элементы крепления к опорам	Атм. факторы - осадки, обледенение, вибрация и пр.	Натяжные механизмы	Натяжные лебедки с контролем	Натяжные лебедки с контролем	Навигочная машина
Оценка срока службы линии	Разряды молний, сторонние организации, механические повреждения, грызуны, влага	Атм. факторы - осадки, обледенение, вибрация и пр.	Ураганные нагрузки	Срок службы ЛЭП – 50 лет	Атм. ф-ры с учетом солнечной радиации	Атм. ф-ры с учетом солнечной радиации	Атм. ф-ры с учетом солнечной радиации
	25 и более лет в зависимости от условий эксплуатации	До 15 лет	До 15 лет	До 25 лет	18-20 лет	До 25 лет	До 25 лет

3.4. Измерения параметров в процессе строительства ВОЛС и приемосдаточные испытания

Для объективной оценки качества строительных работ и успешной последующей эксплуатации ВОЛС строительные и обслуживающие организации должны располагать современным измерительным оборудованием, позволяющим проводить измерения с достоверными результатами.

Парк контрольно-измерительного оборудования многообразен и представлен отечественным и импортным оборудованием. К сожалению, отечественный парк контрольно-измерительного оборудования пока уступает импортному по номенклатуре и характеристикам.

У ОВ и ВОК существует множество параметров, которые можно разделить по группам [38, 39]:

- характеристики передачи и оптические характеристики [41, 42];
- геометрические характеристики;
- механические характеристики;
- климатические и эксплуатационные характеристики.

К оптическим характеристикам относятся [39,43]:

- затухание, коэффициент затухания, потери в стыках;
- дисперсия, полоса пропускания, длина волны нулевой дисперсии;
- числовая апертура, диаграмма направленности;
- профиль показателя преломления;
- диаметр модового поля (для одномодовых ВС);
- критическая длина волны (для одномодовых ВС).

К геометрическим характеристикам относятся [40]:

- длина ВС или ОК, расстояние до места повреждения или неоднородности;
- диаметры сердцевины, оболочки, защитного покрытия ВС, размеры элементов конструкции ОК;
- эксцентриситеты сердцевины по отношению к оболочке и защитному покрытию, а также некруглости сердцевины, оболочки и защитного покрытия.

К механическим характеристикам относятся:

- допустимые растягивающие и раздавливающие усилия для ВС и ОК;
- допустимое число закручиваний и допустимый радиус изгиба ВС и ОК;
- устойчивость к ударам и вибрациям;
- допустимое осесимметричное сжатие (для подводных ОК).

К климатическим и эксплуатационным характеристикам относятся:

- стойкость к повышенным и пониженным температурам, пожароустойчивость;
- стойкость к воздействию атмосферных факторов и, в частности, влаги и агрессивных сред, а также ветровым нагрузкам, обледенению;
- стойкость к воздействию солнечной радиации, трекинго-эрозионная, радиационная;
- герметичность.

Большая часть этих характеристик измеряется при разработке конструкции ВС и ОК во время заводских испытаний. Кроме того, следует разделять задачи измерений в процессе строительства и последующей эксплуатации.

Измерения в процессе строительства

Входной контроль. Производится перед проведением строительных и ремонтных работ, связанных с заменой кабеля и прочих компонентов ВОЛС. В ходе этих измерений контролируется качество строительных длин кабеля и других компонентов, измерения проводятся, как правило, на заводе-изготовителе кабельной продукции, и результаты сравниваются с паспортными данными на строительную длину. При входном контроле проверяют затухание строительной длины, по нему рассчитывают суммарный коэффициент затухания ВОЛС с учетом средних потерь в сварках различных строительных длин между собой и для паспортизации регистрируют рефлектограммы всех ОВ строительной длины. Методика проведения измерений – обычно используемая в самых разнообразных вариантах.

Оценка качества строительных работ. После прокладки строительных длин ВОК осуществляется их контроль и производится сравнение с данными входного контроля. В случае существенного увеличения затухания (более 20% относительно исходных значений) в развернутой строительной длине определяется место повреждения ОК с помощью рефлектометра и рассматриваются варианты устранения повреждения. Необходимо отметить, что результаты измерения затухания строительной длины, размещенной на барабане (входной контроль), как правило, больше чем при развернутой (до 10%), и ее увеличение после прокладки свидетельствует о нарушении технологии строительства ВОЛС.

На следующем этапе производятся контроль параметров следующей строительной длины после ее прокладки и оценка качества работ по монтажу оптической муфты. Основным методом монтажа – сварка оптических волокон

(рис. 3.26).

Контролируются результаты работ по: качеству герметизации муфты,

потерям в месте сварки (соединения) ОВ строительных длин, и производится их сравнение с требованиями нормативных документов.

После сварки волокон строительных длин контролируются потери в местах сварки оптическим рефлектометром [42, 43]. Технология контроля подразумевает предварительное измерение параметров нормализующей длины ОВ (катушка с оптическим волокном того же типа, что и контролируемое, протяженностью около 1 км), затем включение волокон проложенной ВОЛС с последующим измерением. Это позволяет оценить потери как в разъемных соединениях на станции, так и в

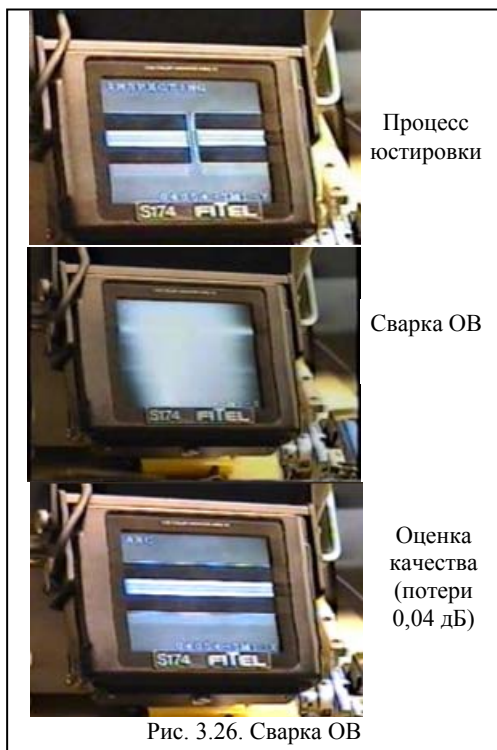


Рис. 3.26. Сварка ОВ

неразъемных в смонтированных муфтах (рис. 3.27).

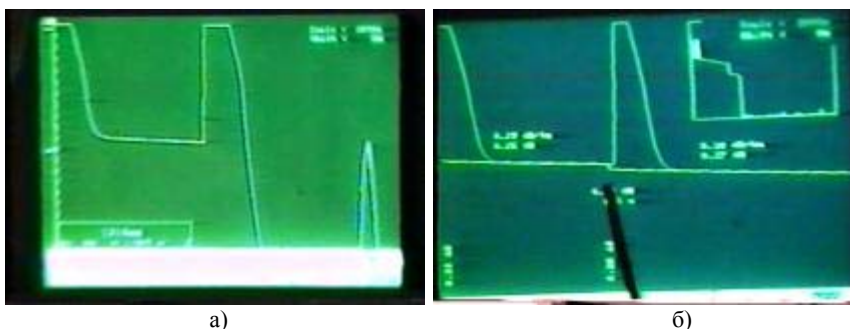


Рис. 3.27. Рефлектограммы – линии, измеряемые при окончании строительства: а – нормализующей длины; б – включенной линии

Собственно с оптоволокном производят два вида измерений.

Первый – это оценка общего затухания сигнала от одного оконечного

устройства до другого. Суть его в том, что, с одной стороны, к волокну подключается инфракрасный лазер с длиной волны, соответствующей требуемому окну прозрачности. С другой – включают фотодиод и по изменению тока через него определяются потери в волокне. Этот класс приборов называют оптическими тестерами. В настоящее время они имеют карманные размеры. Различаются составом отдельного блока, т. е. в каждом блоке могут содержать и излучатель, и приемник или излучатель и приемник отдельно. Эти приборы не способны определить расстояние до повреждения и применяются только для контроля целостности или для приемосдаточных измерений (выдают значение в децибелах).

Второй вид – измерение оптическим рефлектометром (рис. 3.28). Рефлектограмма на оптоволокне красива и понятна. Прибор отмечает то, что принимает за начало линии, конец и другие неоднородности (на рис. 3.28 соответствующие галочки внизу), составляет таблицу этих неоднородностей, называемую таблицей событий, в которую вносит расстояние и величину затухания на всем, что принимает за события.

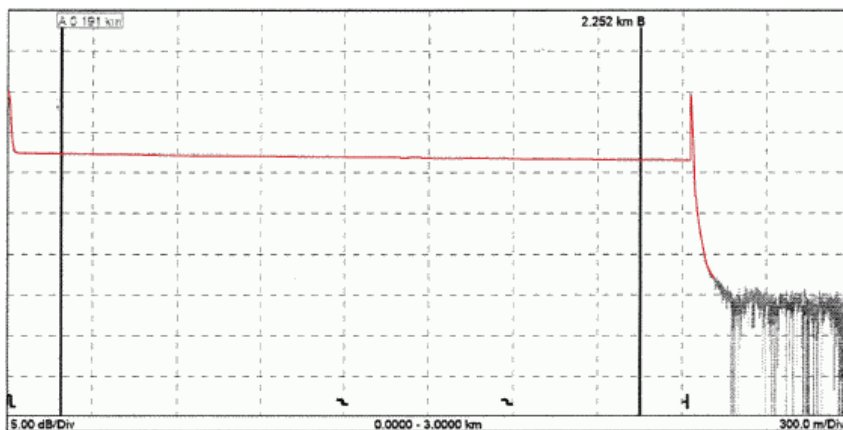


Рис. 3.28. Типичная рефлектограмма оптической линии

Прибор обычно не ошибается или ошибается незначительно. Иногда пропускает хорошо сваренные стыки в муфтах при затухании на них менее 0,05 дБ. В этом случае предусмотрена возможность добавления события в ручную.

Наиболее значимыми параметрами являются:

- длина волны соответствует выбранному окну прозрачности для одномодового 1550 и 1310 нм;
- коэффициент преломления влияет на точность измерения расстоя-

ния, при монтаже и приемосдаточных измерениях берется из паспортов барабанов, а при плановых – из паспорта трассы.

Как правило, вся документация по оптоволокну ведется аккуратно, и «липа» встречается редко.

Оптические рефлектометры могут быть выполнены как цельным прибором, имеющим все «на борту», так и работающими в паре с компьютером. Те, у которых «все в одном», более удобны для работы и компактнее, но стоят дороже. Зато на работающих в паре с ПК можно веселее провести время (все таки полноценный компьютер с собой).

В настоящее время некоторые модели запросто умещаются в кармане. Все оптические рефлектометры имеют возможности для записи и передачи данных на цифровые носители.

Важнейшим процессом при строительстве ВОЛС и сдаче ее в эксплуатацию являются измерения оптоволоконного кабеля в процессе монтажа.

Какой бы совершенной ни была аппаратура для сварки оптоволокну, проверка сварных стыков после монтажа остается обязательной и оговоренной различными нормативными документами. Выполняется оптическими рефлектометрами (OTDR) и ведется с первого стыка на соединении кабель-шнур до самой последней муфты. Стекло осталось стеклом и, несмотря на очистку и совершенные сварочные аппараты, иногда подкидывает сюрпризы.

На теперешнее время выработаны некоторые требования к затуханиям на стыках (неразъемных соединениях). Вот, например, выдержка из РД РБ 02140.17-2003 (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Допустимые потери в неразъемных (сварных) соединениях ОВ

Длина волны λ , мкм	Потери $a_{нс}$, дБ, не более, в %-тах неразъемных соединений	
	100	50
	Для магистральных и внутризоновых сетей	
1,3	0,2	0,1
1,55	0,1*	0,05
	Для местных сетей	
1,3	0,3	
1,55	0,2	
*В исключительных случаях допускается максимальное значение потерь на стыке не более 0,15 дБ, если меньшее значение не достигнуто после 3 повторений сварки. При этом в монтируемой муфте на кассете должен оставаться запас оптического волокна не менее 3 витков.		
Примечание. Значение потерь для каждого неразъемного соединения определяется как среднее арифметическое результатов измерения оптическим рефлектометром с двух сторон ЭКУ.		

Сноска в табл. 3.4 этого документа весьма показательна, не всегда даже хорошими приборами и инструментами можно сварить оптоволокно с затуханием на стыке менее 0,15 дБ. Можно ломать и переваривать стык хоть 10 раз – такое или даже большее затухание останется именно на этой паре волокон. Связывают это с разностью в количестве примесей в сердечнике оптоволокна и с некоторыми особенностями изготовления оптоволоконного кабеля. Так, если соединять кабель с одного и того же барабана, стыки могут оказаться практически неразличимы на рефлектограмме (0,03–0,05 дБ), а при соединении кабеля от разных заводов такие «гладкие» соединения уже не получаются.

Вообще говоря, о нормах на затухание стыков следует напомнить, что они на протяжении 10 лет менялись, как бы следуя за возможностями сварочных аппаратов. При сварке прибором типа КСС, где весь процесс сварки проводился вручну, часто оставались стыки 0,2–0,25 дБ. Просто не удавалось добиться лучшего. С появлением российской «Совы» – сварочника-полуавтомата стыки стали делаться в 0,10–0,15 дБ и до этих значений «подтянули» нормы. Сейчас все профессионалы приобрели аппараты от Fujikura, Ericsson и тому подобные с автоматической сваркой и требования к стыкам оптоволокна возросли. Сейчас уже никто не удивляется стыкам не различимым на рефлектограмме, т. е. 0,03–0,05 дБ.

Начинают процесс соединения проложенных оптических кабелей с оконечного устройства, т. е. с оптического шнура. Первой проблемой для контроля стыка является так называемая мертвая зона рефлектометра, связанная с особенностью работы прибора и зависящая от ширины зондирующего импульса. На рефлектограмме выглядит всплеском, следующим за зондирующим импульсом, как правило, растягивается на десятки метров (на рис. 3.29 – 48,3 м, обведено красным) и делает невозможным контроль первого стыка.

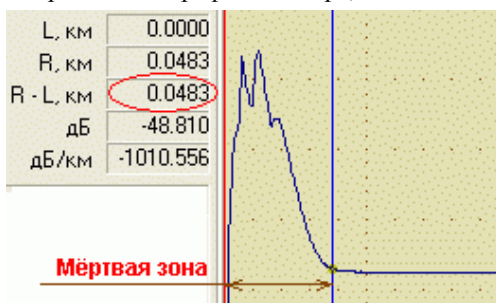


Рис. 3.29. Рефлектограмма на первом стыке

Специально для решения этой проблемы используются нормализующие катушки, состоящие из некоторой длины (0,5–1 км) оптоволокна и позволяющие контролировать первую сварку (первый стык).

Полностью проблемы это не решает, так как соединение на коннекторах катушка-шнур, как правило, имеет большое затухание, да к тому же соз-

дает на рефлектограмме достаточно высокий отраженный импульс (рис. 3.30 всплеск на расстоянии 1 км) и соответственно свою мертвую зону (см. +).

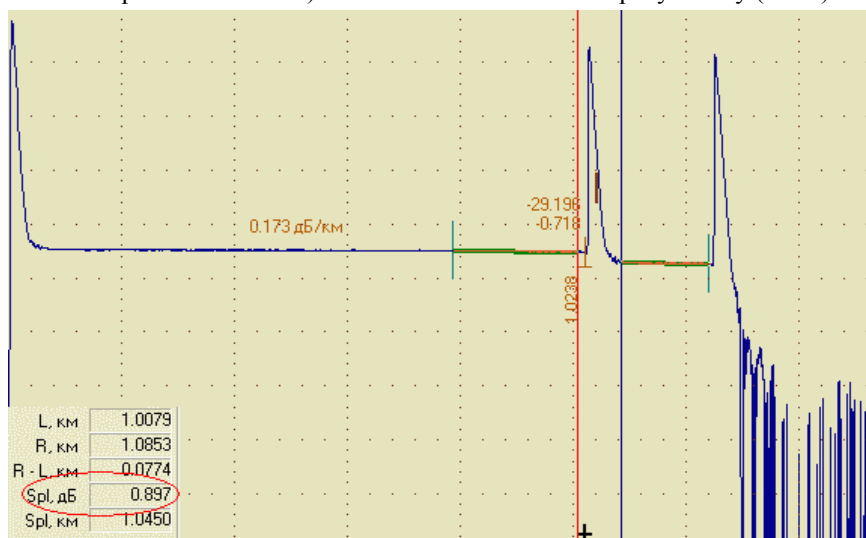


Рис. 3.30. Рефлектограмма на втором стыке

В данном случае контроль относительный, так как невозможно различить, сколько затухания вносят коннектор и сварной стык. На рис. 3.30 измеряется суммарное затухание на соединении, т. е. производится оценка потерь между участками катушка-кабель. В данном случае затухание не соответствует требуемой норме: 0,5 дБ на коннекторе, плюс 0,15 на сварке, т. е. 0,65 дБ, а на картинке (обведено) 0,897 дБ. Данный стык все же был оставлен, так как это лучшее значение после 3–4 сварок и неясно, что вносит такое затухание – коннектор или сварка.

Чтобы контролировать стыки в муфтах, собственно муфты необходимо делать последовательно от начала трассы. Как правило, каких-то дополнительных проблем не возникает, если используется кабель от одного завода-изготовителя и барабаны раскладываются по порядку номеров, выданных на заводе. Кроме того, желательно соблюдать направление укладки, т. е. начало следующего барабана соединяется с концом предыдущего. В этом случае стыки могут оказаться вообще неразличимы (рис. 3.31).

Технология требует контроля с обеих сторон трассы, но при монтаже длинных участков это не всегда выполнимо (требуется «закольцовка» всех волокон на следующей муфте), поэтому трасса контролируется только с одной стороны. А проверка с другой стороны выполняется уже после окончательного

соединения всей линии. При этом, естественно, могут быть накладки (рис. 3.32), которые обнаружатся при измерении с обратной стороны. Иногда приходится возвращаться на готовую муфту, чтобы переделать такую сварку.

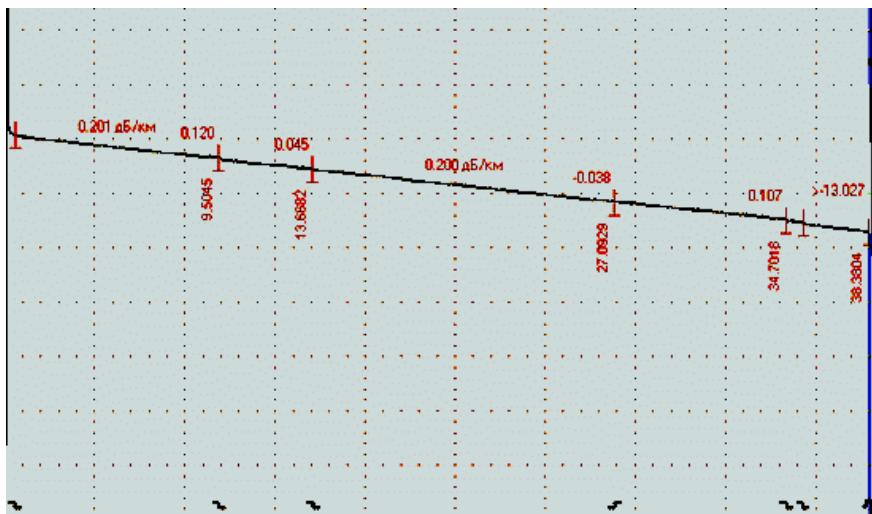


Рис. 3.31. Рефлектограмма линии, протяженностью 38 км с хорошим качеством сварных соединений (различимы 5 соединений)



Рис. 3.32. Пример рефлектограммы плохого стыка

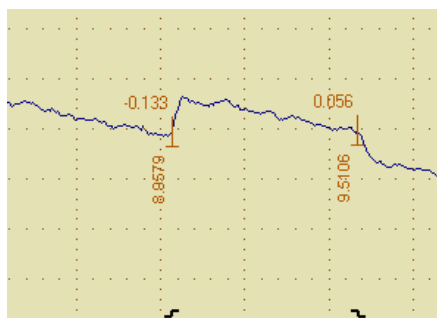


Рис. 3.33. «Отрицательное» затухание на стыке

Как некоторую особенность измерений, оптическим рефлектометром можно выделить возможность получения отрицательного затухания на стыке (рис. 3.33). Если вникнуть в суть картинки на рефлектограмме, можно подумать, что на стыке возник усилительный участок. В данном случае это, конечно, ошибка, причем не ошибка OTDR, а ошибка метода измерений. Не стоит забывать, что измерения рефлектометром носят относительный харак-

тер (абсолютны показания оптического тестера). Волокно, находящееся за стыком, отражает свет более интенсивно, чем волокно перед соединением, а рефлектометр фиксирует это подъемом на рефлектограмме. Подобные стыки часто возникают при соединении оптических волокон от разных производителей кабеля. Часто при монтаже вставка другого кабеля выглядит на экране OTDR как приподнятая платформа (хорошо видно на рис. 3.33). При измерениях с обратной стороны трассы эти подъемы выглядят как «ямы».

Причем именно в таких случаях часто возникают ситуации, когда волокно невозможно сварить с нормальным затуханием на стыке. В данном случае стоит обратить внимание на выписку из руководящего документа (вверху страницы) о том, что значение потерь для каждого неразъемного соединения определяется как среднее арифметическое результатов измерения. Как правило, стык, который сваривается только с большим затуханием с обратной стороны, будет отрицательным. Сложив отрицательное значение с одной стороны и затухание на «плохом» стыке, разделив на два, Вы получите вполне приемлемую цифру.

Стоит заметить, что подобные «ступеньки» на рефлектограмме не делают линию лучше, а скорее являются некоторой неизбежностью.

Описание некоторых «глюков», которые могут возникнуть при измерениях OTDR. На рис. 3.34 так называемый фантом. Появляется редко, как правило, вызывает некоторую растерянность у новичков. Создается впечатление, что оптическое волокно имеет крупную неоднородность в месте, где ее быть не должно. Отличается от неоднородности на волокне своеобразной



Рис. 3.34. Фантом

закругленной «шляпой». Появление фантома связывают с ошибкой импульсного метода измерения. В измеряемой линии появляется своеобразное эхо, которое и вызывает ошибку. Фантом пропадает при изменении диапазона измерений, который рекомендуется устанавливать в

2 раза превышающим предполагаемую длину линии.

Очень важна аккуратность при проведении измерений. Примерно такая картинка (рис. 3.35) видна на экране прибора при засоренном или сло-

манном коннекторе. Не забывайте протирать коннектор спиртом перед подключением к оптическому рефлектометру. Крошечная пылинка способна перекрыть весь световой поток, идущий по волокну. Подобная неприятность может случиться и с коннектором, и с гнездом в приборе.

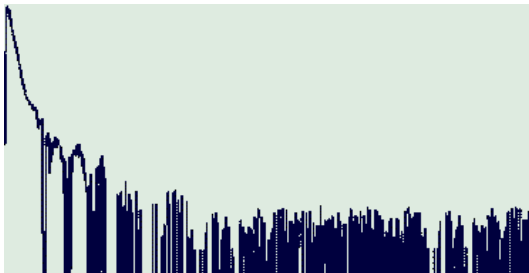


Рис. 3.35. «Грязное» место разъемного соединения

Особенности выполнения строительно-монтажных и измерительных работ с волокном типа NZDS (волокна с ненулевой смещенной дисперсией)

В настоящее время волокна этого типа находят все более широкое применение, особенно на участках магистральной сети, где требуется передача больших объемов трафика (высокие скорости и протяженные участки) [16, 18].

Основная идея состоит в следующем.

Стандартное одномодовое волокно, имеющее ступенчатый профиль показателя преломления, было разработано так, что нулевое значение дисперсии пришлось на длину волны 1,31 мкм (2-е окно прозрачности). Со временем оказалось, что более перспективным с точки зрения оптической связи является длина волны 1,55 мкм – 3-е окно прозрачности. Было разработано волокно с нулевой дисперсией на длине волны 1,55 мкм, так называемое волокно со смещенной дисперсией (DS). Это было сделано путем изменения профиля показателя преломления, что увеличило волноводную дисперсию (рис. 3.36). Следующим шагом явилась разработка волокна со смещенной ненулевой дисперсией (NZDS), позволившего решить задачу подавления нелинейных эффектов, прежде всего, перекрестным помехам из-за 4-волнового смешения.

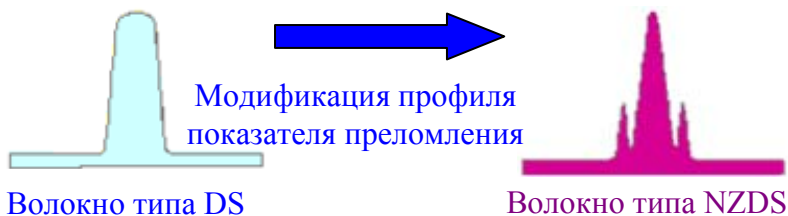


Рис. 3.36. Изменение профиля показателя преломления для снижения уровня нелинейных эффектов

Дисперсия в NZDS меньше, чем в стандартном волокне, поэтому расстояние, на которое можно передать сигнал без компенсаторов дисперсии, возрастает (табл. 3.5). Наиболее заметным это становится, начиная со скоростей передачи 10 Гбит/с и выше.

Таблица 3.5

Расчетные длины участков регенерации

Скорость передачи, Гбит/с	Предельное расстояние передачи сигнала без компенсации дисперсии в волокне, км	
	NZDS (G.655)	Стандартное одномодовое (G.652)
STM 16 (2,5)	300–500	180–250
STM 64 (10)	150–220	40–70
STM 256 (40)	20–30	< 8

Меняя форму профиля показателя преломления (глубину провалов), существует возможность создавать NZDS-волокна как с положительной, так и с отрицательной величиной дисперсии, что открывает возможность сбалансировать дисперсию в оптической линии без использования дополнительных устройств. Суть такой балансировки в том, что отрезки волокон с положительной и отрицательной дисперсией чередуются, в результате чего вызванные дисперсией искажения импульса сигнала в «плюс»-волокне компенсируются в «минус»-волокне. При этом в любой точке линии существует необходимый для подавления нелинейных эффектов уровень дисперсии.

Существует также возможность компенсировать дисперсию и в линиях, построенных из стандартного волокна, установкой в них волоконных дисперсионных компенсаторов. Дисперсионный компенсатор представляет собой бухту из волокна с большим уровнем дисперсии. Однако встраивание в линию таких компенсаторов приводит к необходимости увеличения мощности, а соответственно, и стоимости оптических усилителей.

Эта особенность оптических волокон типа **NZDS** и определяет соответствующие требования при строительстве ВОЛС и ее монтаже. Важно не перепутать строительные длины с волокнами **+NZDS** и **-NZDS**, разница между которыми состоит в диаметре ведущей жилы (сердцевины волокна) и некоторых изменениях в профиле показателя преломления. В волокнах, изготавливаемых фирмами Lucent Technology и Fujikura, диаметр модового поля составляет 8,4 мкм, в волокнах фирмы Corning – 9,5 мкм. Уменьшение диаметра модового поля приводит к усилению нелинейных эффектов, что компенсируется увеличением уровня дисперсии. Оба перечисленных типа волокон в равной мере обеспечивают подавление нелинейных эффектов. Однако

волокна Lucent и Fujikura обладают меньшими потерями на сгибах и более пологой дисперсионной кривой. Доля рынка NZDS-волокон Lucent Technology и Fujikura составляет 70%, Corning – 30% (рис. 3.37).

Волокно со смещенной, но ненулевой дисперсией (G.655)



+	Подавление нелинейных эффектов	+
+	Потери на изгибе	+
+	Наклон дисперсионной кривой	-
70%	Доля рынка	30%

Рис. 3.37. Оптические волокна основных фирм-производителей на российском рынке

В настоящий момент предполагается, что время жизни оптической линии в России составляет порядка 25 лет, учитывая тенденции развития технологий волнового уплотнения, весьма вероятно, что за 25 лет придется от 2 до 4 раз обновить оконечное оборудования.

Исходя из этого, представляется целесообразным уже сейчас использовать при прокладке линий NZDS-волокно с учетом будущей перспективы перехода на частотное уплотнение или другие, возможные технологические новшества в области передачи сигнала. В этом случае уже сейчас надо задумываться о том, как монтировать оптические кабели, в которых уложены волокна NZDS (рис. 3.38).

Многие фирмы за рубежом и ряд отечественных компаний уже используют при прокладке линий кабель, содержащий NZDS-волокна.

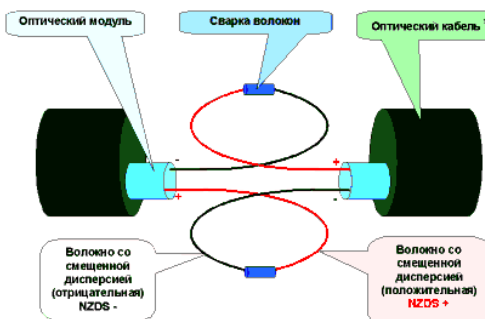


Рис. 3.38. Схема монтажа сбалансированного по дисперсии оптического кабеля

Существуют два варианта прокладки кабеля с NZDS-волокном: чередование отрезков кабеля, содержащих волокна с разным знаком дисперсии, или

использование «сбалансированного» по дисперсии кабеля. «Сбалансированный» кабель содержит пары волокон как с положительной, так и с отрицательной дисперсией, «плюс» и «минус» волокна окрашены в разные цвета. При монтаже волокна просто «перекрещиваются» (рис. 3.34). Второй вариант, очевидно, является более предпочтительным, поскольку оставляет возможность для изменения конфигурации сети и ответвлений (в каждой точке линии есть и «плюс» и «минус»-волокна), а также гарантирует от ошибок при прокладке.

Механические свойства волокон со смещенной ненулевой дисперсией и требования по их кабелированию не отличаются от аналогичных свойств стандартных одномодовых волокон. Поэтому при производстве оптического кабеля на основе NZDS-волокна можно использовать стандартные, хорошо отработанные технологии, точно так же как и при их прокладке.

При сварке такого кабеля есть две основных особенности: необходимо перекрещивать волокна разных знаков дисперсии и увеличить в 1,4 раза ток разряда, по сравнению с режимом сварки стандартного оптического волокна.

В выпускаемых в настоящее время сварочных аппаратах нет специального режима для NZDS-волокна, но фирма Fujikura уже анонсировала такой режим.

Определенные особенности существуют также и при проведении измерений линий из NZDS-волокна. По причине «молодости» этого типа волокон и того, что технологические режимы при изготовлении NZDS-волокна сложнее, существует некоторый разброс диаметра модового пятна, который не превышает принятых стандартов, но он больше, чем в обычном одномодовом волокне. Вследствие этого на рефлектограммах линии могут возникнуть перепады уровня, соответствующие местам сварки волокон. Величина этих перепадов порядка 0,3 дБ. В данном случае для получения достоверной информации о линии недостаточно односторонней рефлектограммы. Необходимо использовать двухстороннюю рефлектограмму, т. е. усреднение двух рефлектограм, снятых с противоположенных концов линии. На рис. 3.39 и 3.40 приведена двухсторонняя рефлектограмма NZDS-линии, полученная с помощью рефлектометра фирмы Ando, из которой видно, что средние потери на сварном соединении не превышают 0,03 дБ, а погонное затухание – 0,25 дБ/км.

Таким образом, как при строительстве ВОЛС, так и в процессе ее монтажа могут возникнуть сложности, обусловленные не только конструкцией оптического кабеля, но и типом оптических волокон, которые в нем находятся. Это требует должного обеспечения измерительным оборудованием всех строительно-монтажных бригад, причем не только тем, которое позволит определить потери на стыках и общее затухание линии, но и определить, ка-

кое волокно уложено и как его монтировать в структуре линии.

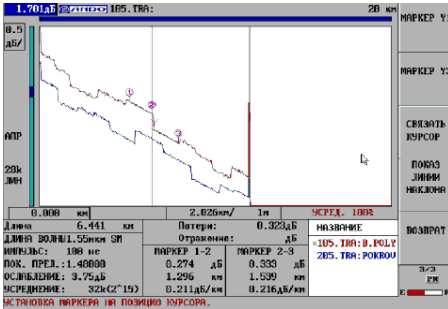


Рис. 3.39. Рефлектограммы участка линии, снятые с двух сторон

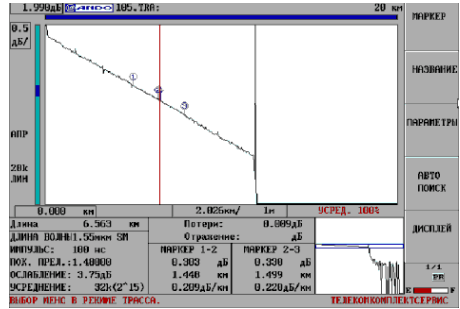
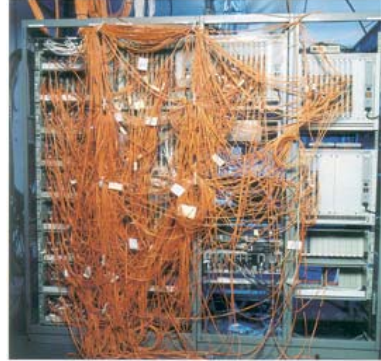


Рис. 3.40. Рефлектограммы участка линии, усредненная с двух сторон

Безусловно, строительно-монтажные работы должны где-то начинаться и где-то заканчиваться. В этом смысле естественным окончанием результатов строительства ВОЛС является всем привычная стойка под названием – **кросс** (рис. 3.41). Это позволяет не только коммутировать оптические волокна, но и производить их контроль, диагностику, подключать различные измерительные приборы и системы мониторинга.



а)



б)

Рис. 3.41. Примерный вид кроссового помещения для ВОЛС:
а – правильно; б – неправильно

На этом можно было бы закончить рассмотрение вопросов строительства ВОЛС, но мешает одно обстоятельство – вариантов реализации проектов бесконечное множество и их все невозможно описать и даже представить. Исследование многообразия вариантов реализации проектов строительства ВОЛС, их оценки по тем или иным критериям и построению системы рекомендаций (во всяком случае для студентов) по применению способов строительства ВОЛС в конкретном регионе позволит выбрать оптимальный вариант реализации.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ СВЯЗИ

Успешно завершив первые два этапа – проектирование ВОЛС как новое, так и создание различных вариантов проектов реконструкции существующих металлических или волоконно-оптических линий связи, последующее строительство ВОЛС или выполнение работ по реконструкции, неизбежно происходит переход к следующему этапу – построению новой системы технической эксплуатации линейных сооружений связи (СТЭЛСС).

Этот этап является наиболее ответственным с точки зрения создания условий нормального функционирования объекта эксплуатации, обеспечении всех качественных и количественных характеристик последнего, при этом необходимо помнить о затратах, необходимых для поддержания объекта в постоянной работоспособности.

Задача оптимизации построения СТЭЛСС может быть решена на основе анализа так называемых «больших систем» (БС), характеризующихся множеством состояний, огромным набором входных и выходных параметров, между которыми имеются функциональные и статистические зависимости. Прежде всего, необходимо рассмотреть, насколько линейные сооружения связи (ЛСС) удовлетворяют основным признакам БС [45, 47].

«Система создана человеком из различного вида оборудования и сырья» – этому признаку полностью удовлетворяют все типы трактов и ЛСС.

«Система обладает цельностью – все ее части и элементы служат достижению единой цели – выработке определенной продукции с помощью набора оптимизированных выходов при заданных входных воздействиях». ЛСС и тракты КМ предназначены для единой цели – передачи возможно большего объема информации с заданным качеством при оптимизированных по определенным критериям конструктивных и стоимостных параметрах и ограниченных входных и выходных воздействиях внутренних и внешних факторов, т.е. полностью соответствуют этому признаку.

«Система является большой как с точки зрения разнообразия ее элементов, так и с точки зрения одинаковых частей и выполняемых ими функций». ЛСС и тракты КМ состоят из большого числа строительных длин кабеля, единых по своей структуре, различного рода активного оборудования, одинакового для конкретного тракта и выполняющих одинаковые функции.

«Система является сложной». Это означает, что изменение какой-либо переменной влечет за собой изменение многих других переменных, причем подобная зависимость редко является линейной и часто носит стохастиче-

ский характер. ЛСС и тракты КМ более чем полно отвечают данному признаку. Изменения температуры грунта, воздействия внешних факторов, изменения характеристик оборудования (например, деградация источника излучения), приводят к случайным изменениям функциональных характеристик всей системы, колебаниям коэффициента ошибок в цифровых трактах и т. п.

«Система является полуавтоматической». Это означает, что часть функций системы выполняется автоматически, а часть – человеком, что происходит в процессе эксплуатации, контроля и ремонтно-восстановительных работах на любых линиях связи.

«Входные воздействия системы имеют стохастическую природу». Отсюда следует невозможность полного предсказания поведения системы для любого момента времени. Применительно к ЛСС и трактам КМ это означает случайный характер возникновения отказов, невозможность точного определения в каждый момент времени загрузки тракта и т. д.

«Большинство систем и в первую очередь наиболее сложные системы содержат элементы конкурентной ситуации». В нашем случае в процессе проектирования приходится рассматривать несколько вариантов от простой замены оборудования до строительства новых волоконно-оптических линий, чтобы обеспечить передачу заданного объема информации с требуемым качеством, а также возможность увеличения трафика в процессе развития.

4.1. Принципы системного подхода к анализу СТЭЛСС

Задача оптимизации больших систем по определенным критериям сложна, поэтому обычно ее разбивают на ряд направлений в идеологическом, организационном и реализационном планах. Подобные методы деления не должны допускать взаимные непрерывные переходы, т. е. они должны представлять собой ортогональные векторы в пространстве системы.

Для систем ЛСС возможно следующее деление:

- аппарат для анализа и конструирования СТЭЛСС. В качестве этого аппарата используются разделы математического анализа, необходимые при исследовании параметров передачи, помех и возмущений действующих на ЛСС, математические методы исследования операций и, в частности, методы оптимизации параметров систем, различные способы построения математических моделей систем и оценке степени адекватности этих моделей создаваемым системам;

- фазы или периоды (во времени) и этапы (логические) конструирования СТЭЛСС. Применение подобного разбиения позволяет расчленить задачу оптимизации на ряд «фаз» и «этапов»: по времени проведения работы или

по ее логической последовательности. В действительности это разбиение часто не соблюдается, а иногда, например, при ограниченном времени создания системы ряд «этапов» и «фаз» выполняются одновременно или в другом порядке. Очень часто, например, при анализе надежности кабельных магистралей или путей повышения эффективности и качества их работы рассматриваются различные фазы и периоды эксплуатации КМ, а также возможности ее оптимизации по мере создания новых, более совершенных методов эксплуатации;

- подсистемы. Каждый линейный тракт или ЛСС могут рассматриваться как подсистема более крупной системы, например первичной сети. Расчленение сложных систем на подсистемы производится до тех пор, пока не будут получены элементы системы, т.е. такие объекты, которые в условиях данной задачи не подлежат расчленению. Однако при использовании и оптимизации таких объектов необходимо учитывать, что в исходной системе они функционируют во взаимодействии друг с другом и свойства БС определяются не только свойствами данных объектов, но и характером их взаимодействия в структуре БС (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Возможный вариант представления СТЭЛСС

4.2. Критерии эффективности СТЭЛСС и моделирование процессов в системе

Можно выделить следующие основные этапы работ при определении критерия эффективности СТЭЛСС:

- анализ основных свойств заданного или выбираемого критерия эффективности;
- оценка сложности исходной функции, связывающей данный критерий с варьируемыми параметрами;
- определение возможности контроля за достижением и сохранением оптимального состояния ЛСС на оптимизируемой фазе;
- разработка методов, устройств и подсистем, обеспечивающих целесообразную или достижимую степень улучшения критерия эффективности работы;
- оценка эффективности по качеству и внедрение полученных рекомендаций.

Одним из важнейших критериев оценки СТЭЛСС является оценка эффективности по качеству. Он имеет важное значение не только потому, что в существенной мере определяет целесообразность оптимизации системы по этому критерию, но и позволяет сопоставить и оценить эффективность ортогональных между собой критериев эффективности по значению ожидаемого экономического эффекта.

Понятие оптимизации «по качеству» в первую очередь относится к системам высокой стоимости и длительного срока работы, к которым, несомненно, принадлежат и СТЭЛСС. В этой системе с течением времени наблюдается моральное старение отдельных подсистем, устройств, технологий, что приводит к ухудшению параметров системы в целом.

Проектные решения как по созданию новых участков сети с заданной пропускной способностью, так и реконструкция существующих, придают новые свойства СТЭЛСС, которые должны обеспечить повышение ее эксплуатационных характеристик при увеличении пропускной способности линий связи, сокращение времени проведения ремонтно-восстановительных работ. Оптимизацию в этом случае можно рассматривать как дискретный, итерационный процесс, при котором с каждым шагом итерации, соответствующим повышению эффективности и качества работы СТЭЛСС, происходит приближение системы к оптимальному состоянию.

Таким образом, с каждым итерационным шагом образуется новая модель, в которой большинство подсистем может оставаться неизменными или

изменяться частично, а одна или несколько подсистем изменяются существенно, придавая модернизируемой системе главные отличительные признаки.

Многие случайные процессы, протекающие в ЛСС, особенно в линейных трактах и кабельных линиях, с достаточно высокой степенью приближения можно отнести к марковским процессам, или процессам без последействия [46]. Они обладают следующими свойствами – для каждого момента времени t_0 , вероятность любого состояния системы в момент $t > t_0$ зависит только от ее состояния при $t = t_0$ и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние.

Действительно, пусть необходимо оценить в будущем качество работы некоторой СТЭЛСС, находившейся длительное время в эксплуатации и характеризующейся определенной степенью изношенности. Очевидно, что вероятность любого состояния системы зависит только от ее состояния в настоящем времени при $t = t_0$ и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние.

Процессы, происходящие в ЛСС, обычно относят к марковским процессам с дискретным состоянием и непрерывным временем.

Допустим, что СТЭЛСС имеет ряд дискретных, случайных состояний S_1, S_2, \dots, S_n . Например, S_1 – кабельная магистраль исправна, S_2 – в одном из трактов каналы имеют пониженное качество (увеличенный уровень шумов в аналоговых системах, увеличение коэффициента ошибок в цифровых), S_i – полный отказ одного из трактов, S_n – полный отказ всех трактов.

Переход системы S в различные состояния может осуществляться в любой момент времени. События S_1, S_2, \dots, S_n несовместимы и образуют полную группу состояний, так что сумма вероятностей $p_i(t)$ – вероятность того, что в момент времени t система будет находиться в состоянии S_i и для любого момента времени равна единице:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad (4.1)$$

Пусть вероятность перехода системы из состояния i в состояние j известна и равна p_{ij} , тогда можно ввести понятие о плотности вероятности перехода:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [p_{ij}(t) / \Delta t]. \quad (4.2)$$

Зная плотности вероятностей перехода для системы, можно составить так называемый граф состояния системы, например для $n=5$ (рис. 4.2).

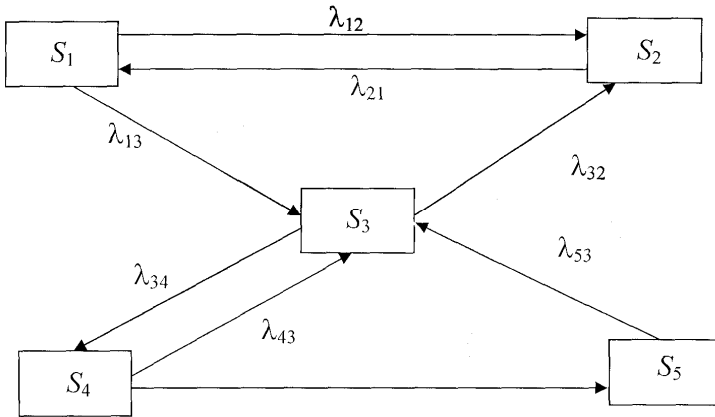


Рис. 4.2. Размеченный граф состояний

Если все плотности вероятностей перехода λ_{ij} не зависят от t , то марковский процесс называется однородным; если эти плотности представляют собой какие-то функции времени $\lambda_{ij}(t)$, процесс называют неоднородным.

В последнем случае часто заменяют $\lambda_{ij}(t)$ его математическим ожиданием

$$M[\lambda_{ij}(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(t)_{ij} dt, \quad (4.3)$$

где T – рассматриваемый интервал времени.

В результате неоднородный процесс сводится к однородному.

Зная размеченный граф, можно определить вероятности $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ из дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Колмогорова, составляемых по следующему правилу [44]: левая часть каждого уравнения состоит из производной вероятности состояния, а правая часть содержит столько членов, сколько стрелок размеченного графа связано с данным состоянием. Если стрелка направлена из состояния, соответствующий член имеет знак «минус», если в состояние – знак «плюс». Каждый член равен произведению плотности вероятности перехода, соответствующей данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка.

Рассмотрим типичную для многих процессов, протекающих в СТЭЛСС непрерывную марковскую цепь, называемую схемой «гибели и размножения».

Граф этой цепи представлен на рис. 4.3 и имеет вид вытянутой цепочки, в которой каждое из соседних состояний (S_2, S_3, \dots, S_{n-1}) связано прямой и обратной связями с каждым из соседних состояний, а крайние состояния (S_1, S_2) – только с одним соседним состоянием.

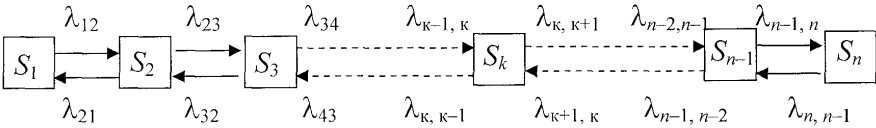


Рис. 4.3. Граф процесса «гибели и размножения»

Алгебраические уравнения предельных вероятностей состояния для такого графа имеют следующий вид:

для состояния S_1

$$\lambda_{12} p_1 = \lambda_{21} p_2, \quad (4.4)$$

для состояния S_2

$$\lambda_{12} p_1 + \lambda_{32} p_3 = (\lambda_{23} + \lambda_{21}) p_2. \quad (4.5)$$

Аналогично можно найти

$$\lambda_{k-1, k} p_k = \lambda_{k, k-1} p_{k-1}. \quad (4.6)$$

Пользуясь уравнениями типа (4.6), можно составить выражение для вычисления предельной вероятности состояния p_1 и уравнение связи для расчета остальных вероятностей:

$$\begin{aligned} p_1 = & [1 + \lambda_{12} / \lambda_{21} + (\lambda_{23} \lambda_{12}) / (\lambda_{32} \lambda_{21}) + \dots \\ & + (\lambda_{k-1, k} \lambda_{k-2, k-1} \lambda_{12}) / (\lambda_{k, k-1} \lambda_{k-1, k-2} \dots \lambda_{21}) + \\ & + (\lambda_{n-1, n} \dots \lambda_{12}) / (\lambda_{n, n-1} \lambda_{21})]^{-1}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

и

$$\begin{aligned} p_2 = & (\lambda_{12} / \lambda_{21}) p_1, \quad p_3 = (\lambda_{23} \lambda_{12}) / (\lambda_{32} \lambda_{21}) p_1, \\ p_n = & (\lambda_{n-1, n} \dots \lambda_{12}) / (\lambda_{n, n-1} \lambda_{21}) p_1. \end{aligned} \quad (4.8)$$

В качестве примера рассмотрим реконструированный линейный тракт кабельной магистрали, состоящий из трех трактов цифровой системы передачи (ЦСП) типа РСМ-480.

Поток отказов простейший, распределен по показательному закону и обладает тремя свойствами:

- стационарностью;
- ординарностью (события в потоке происходят по одиночке);
- отсутствием последействия (т.е. число событий, приходящихся на один отрезок времени, не зависят от того, сколько событий попало на другой отрезок времени).

Среднее время безотказной работы каждого тракта – $T_{\bar{6}}$ ср.

Ремонт отказавшего тракта начинается немедленно (это самый дорогой вариант), при этом:

- среднее время ремонта (восстановления) – $T_{\bar{в}}$ ср;
- закон распределения этого времени – показательный, поток восстановления – простейший.

Найти среднюю производительность кабельной магистрали $A_{\text{ср}}$, если при трех работающих трактах она равна 100%, при двух – 80%, при одном – 50%, а при выходе из строя всех трактов – магистраль не работает.

Возможные состояния системы нумеруем по числу неисправных трактов: S_0 – все тракты исправны; S_1 – один тракт отказал и восстанавливается; S_2 – два тракта восстанавливаются, один исправен; S_3 – три тракта восстанавливаются, магистраль не работает. Построим и разметим граф состояний (рис. 4.4). Вправо систему переводят отказы. Если система находится в состоянии S_0 , т. е. все тракты работают и каждый из них подвержен потоку отказов с интенсивностью $\lambda = 1/T_{\bar{6}}$ ср, то общий поток отказов будет в три раза больше: $\lambda_{01} = 3/T_{\bar{6}}$ ср. При выходе из строя одного тракта (состояние S_1) интенсивность потока отказов – $\lambda_{12} = 2/T_{\bar{6}}$ ср; при выходе из строя двух трактов (состояние S_2) – $\lambda_{23} = 1/T_{\bar{6}}$ ср.



Рис. 4.4. Размеченный граф состояний

Влево систему переводят ремонты (работа СТЭЛСС) трактов. Из состояний S_2 , S_3 система переводится с интенсивностью $\lambda_{32} = 3/T_{\bar{в}}$ ср ($T_{\bar{в}}$ ср – среднее время восстановления трактов, ремонтируются все 3 тракта). Анало-

гично получаем $\lambda_{21} = 2/T_{в\text{ ср}}$ и $\lambda_{10} = 2/T_{в\text{ ср}}$.

Воспользовавшись уравнениями (4.7), (4.8) и заменив индексы, получаем

$$\begin{cases} P_0 = 1/[1 + 3(T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}}) + 3(T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}})^2 + (T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}})^3], \\ P_1 = 3(T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}})P_0, \\ P_2 = 3(T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}})^2 P_0, \\ P_3 = (T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}})^3 P_0. \end{cases} \quad (4.9)$$

Средняя производительность кабельной магистрали в установившемся режиме:

$$A_{ср} = P_0 + 0,8 P_1 + 0,5 P_2. \quad (4.10)$$

Вычислим значения P_i и $A_{ср}$, задавшись конкретными цифрами.

Положим $(T_{в\text{ ср.}}/T_{б\text{ ср.}}) = 4 \cdot 10^{-2}$, $T_{в\text{ ср.}} = 4,5$ ч, тогда

$$P_0 = 0,889; P_1 = 0,107; P_2 = 4,27 \cdot 10^{-3}; P_3 = 8,9 \cdot 10^{-7}; A_{ср} = 97,67\%.$$

Эти цифры говорят о том, что в данном примере СТЭЛСС на 98% справляется со своей задачей. Однако возникает вопрос – от чего зависят вероятности, приведенные в данном примере, и как это будет выглядеть в других вариантах при значительно более высоких нагрузках трактов, особенно ВОЛС.

4.3. Основные задачи и параметры системы эксплуатации ЛСС

Основной задачей СТЭЛСС и линейных трактов является обеспечение бесперебойной работы трактов и каналов связи при заданном количестве и качестве передаваемой информации и минимальных эксплуатационных расходах. Эта задача решается в условиях воздействия на ЛСС различных дестабилизирующих факторов, приводящих к появлению неисправностей, ухудшению качества передаваемой информации, отказом действия связи в части каналов, отдельных трактов или полному прекращению связи на данном участке сети. При любом отказе в системе эксплуатации должно предусматриваться принятие мер по немедленному устранению причин отказа.*

Несмотря на разнообразие физических процессов, протекающих в СМО, общим для них является то, что они предназначены для выполнения

* В этом смысле СТЭЛСС по задачам и параметрам может быть соотнесена с системами массового обслуживания (СМО).

(обслуживания) некоторых потоков заявок, поступающих в СМО в случайные моменты времени, которые осуществляются с помощью заданного числа обслуживающих единиц, называемых каналами обслуживания [47].

Назовем потоки отказов, возникающих в ЛСС, потоками заявок, поступающими в СТЭЛСС. Действительно, поток заявок в СТЭЛСС образуется случайным потоком отказов и неисправностей и характеризуется его интенсивностью λ . Поток является случайным марковским процессом с непрерывным временем и может быть отнесен к простейшим. Это означает, что данный поток заявок не обладает последствием, является стационарным и ординарным, т.е. вероятность попадания на элементарный участок двух и более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного события. Справедливость этого утверждения подтверждается малостью среднего времени восстановления $T_{в\text{ ср}}$ по сравнению с временем безотказной работы.

Время восстановления в СТЭЛСС является аналогом времени обслуживания СМО, а производительность СТЭЛСС

$$\mu = 1/T_{в\text{ ср}} \quad (4.11)$$

эквивалентна параметру пропускной способности СМО [47].

Как известно, основной задачей теории СМО является установление зависимости между характером потока заявок, числом каналов, их производительностью, правилами работы СМО и эффективностью обслуживания. В СТЭЛСС каждый отказ или неисправность в течение различного времени обязательно устраняются, поэтому эти системы должны быть отнесены к СМО с неограниченным ожиданием.

Параметрами эффективности таких систем являются [47]:

- среднее время пребывания заявки на обслуживание в очереди – время устранения отказа (неисправности);
- среднее число заявок в очереди;
- среднее число заявок в системе (в очереди и на обслуживании).

Число каналов обслуживания в системе СТЭЛСС зависит от протяженности анализируемой магистрали. В простейшем случае это число равно 1, а в общем случае СТЭЛСС может быть многоканальной.

Одноканальную ($n=1$) СТЭЛСС с интенсивностью потока заявок (отказов) λ и интенсивностью обслуживания μ можно представить в виде размеченного графа состояний (рис. 4.5).

Пронумеруем состояние СТЭЛСС по числу заявок, находящихся в

системе:

S_0 – канал обслуживания свободен;

S_1 – канал обслуживания занят, очереди нет;

S_2 – канал занят, одна заявка стоит в очереди;

S_k – канал занят, $k-1$ заявок стоят в очереди;

S_{m+1} – канал занят, m заявок стоят в очереди.

Как видно из рис. 4.5, изображенный граф состояний представляет собой схему «гибели и размножения».

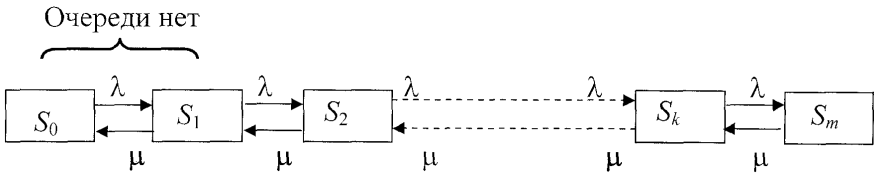


Рис. 4.5. Размеченный граф состояний для одноканальной СТЭЛСС

Выражения для предельных вероятностных состояний выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} P_0 = (1 - \rho) / (1 - \rho^{m+2}), \\ P_1 = P_0 \rho, \\ P_2 = P_0 \rho^2, \\ P_{m+1} = P_0 \rho^{m+2}, \end{cases} \quad (4.12)$$

где $\rho = \lambda / \mu$ – коэффициент соотношения между интенсивностью потока отказов и производительностью системы обслуживания, равный

$$\rho = \lambda / \mu = T_{в\text{ ср}} / T_{б\text{ ср}}. \quad (4.13)$$

Заметим, что при $\rho \ll 1$, когда $T_{в\text{ ср}} \ll T_{б\text{ ср}}$, вероятность образования очереди в СЭЛСС весьма мала.

Это положение справедливо для полных отказов связи на магистрали. Однако при моделировании процессов в СТЭЛСС для ряда неисправностей, не приводящих к полному закрытию действия связи, или при определении динамических параметров СТЭЛСС значение ρ может быть близким к единице.

Рассмотрим сначала наиболее важный для практики случай полных отказов, когда $\rho \ll 1$.

В этом случае при $m \gg 1$, $\rho^{m+2} \rightarrow 0$ и из (4.12) непосредственно получим:

$$\begin{cases} P_0 = 1 - \rho, \\ P_1 = (1 - \rho) / \rho, \\ P_2 = (1 - \rho) / \rho^2, \\ P_k = (1 - \rho) / \rho^k, \end{cases} \quad (4.14)$$

где k – номер состояния СТЭЛСС, для которого при заданной погрешности производится расчет значений P .

Определим среднее число заявок в очереди ($R_{\text{ср}}$), умножая число заявок на значение предельной вероятности (4.12):

$$R_{\text{ср}} = 1P_2 + 2P_3 + \dots + mP_{m+1} \approx P_0 \rho^2 (1 + 2\rho + 3\rho^2 + \dots + m\rho^{m-1}). \quad (4.15)$$

Сумма, стоящая в скобках, представляет собой производную геометрической прогрессии $\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^m$, значение которой

$$S = (\rho - \rho^{m+1}) / (1 - \rho). \quad (4.16)$$

После дифференцирования (4.16) по ρ получаем

$$S' = [1 - \rho^m (m+1 - m\rho)] / (1 - \rho)^2 \quad (4.17)$$

Подставив (4.17) в (4.15), будем иметь

$$R_{\text{ср}} = \frac{\rho^2 [1 - \rho^m (m+1 - m\rho)]}{(1 - \rho)(1 - \rho^{m+2})}. \quad (4.18)$$

Для повреждений с отказом действия связи, когда $\rho^m \rightarrow 0$

$$R_{\text{ср отк}} = \rho^2 / (1 - \rho). \quad (4.19)$$

В ряде случаев кроме среднего числа заявок в очереди представляет интерес определение общего числа заявок в системе ($K_{\text{ср}}$), которое складывается из заявок в очереди и среднего числа обслуживаемых заявок:

$$K_{\text{ср}} = R_{\text{ср}} + (\rho - \rho^{m+2}) / (1 - \rho^{m+2}), \quad (4.20)$$

где $(\rho - \rho^{m+2}) / (1 - \rho^{m+2}) = q_{\text{ср}}$ – среднее число заявок, находящихся на обслуживании; при $\rho^{m+2} \rightarrow 0$ получаем $K_{\text{ср отк}} = R_{\text{ср}} + \rho / (1 - \rho)$.

Среднее время ожидания заявки в очереди

$$T_{\text{ср ож}} = P_1 1/\mu + P_2 2/\mu + \dots + P_m m/\mu, \quad (4.21)$$

или после выполнения суммирования путем подстановки значений из (4.12)

$$T_{\text{ср ож}} = R_{\text{ср}} / \rho\mu = R_{\text{ср}} / \lambda, \quad (4.22)$$

где $R_{\text{ср}}$ вычисляется по (4.18).

Для $P_m \rightarrow 0$ в результате подстановки в (4.21) выражения (4.19) получаем

$$T_{\text{ср ож}} = \rho^2 / \lambda(1 - \rho) = \rho / \mu(1 - \rho). \quad (4.23)$$

Среднее время нахождения заявки в системе ($t_{\text{сист}}$), определяемое вре-

менем ожидания и обслуживания,

$$t_{\text{сист.}} = T_{\text{ср.ож}} + 1/\mu = 1/\mu(1 - \rho). \quad (4.24)$$

Для случая трудно устранимой неисправности ЛСС с сохранением действия связи введем ограничение очереди заявок числом m_1 (максимальное время ожидания).

Тогда, как указывалось выше, вероятность отказа выполнения заявки $P_{\text{отк}}$ появится, если канал занят и заняты все m_1 мест в очереди:

$$P_{\text{отк}} = P_{m+1} = \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}. \quad (4.25)$$

Рассмотрим СТЭЛСС с n каналами обслуживания.

Размеченный граф состояний для n -канальной системы с интенсивностью потока заявок λ , производительностью μ и числом мест в очереди m представлен на рис. 4.6.

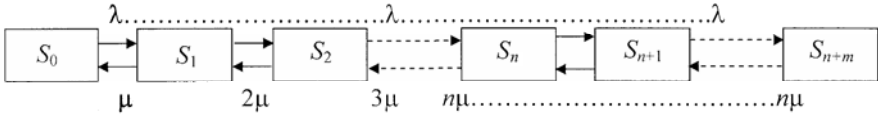


Рис. 4.6. Размеченный граф состояний для многоканальной СЭЛСС

Состояние системы, как и в предыдущем случае, нумеруем по числу заявок и занятым каналам:

S_0 – все каналы свободны;

S_1 – один канал занят;

S_2 – два канала заняты;

S_n – заняты n каналов;

S_{n+1} – заняты n каналов, одна заявка в очереди;

S_{n+m} – заняты n каналов, m заявок в очереди;

S_{n+m+1} – заняты n каналов, $m+1$ заявка получила отказ.

Пользуясь схемой «гибели и размножения», запишем выражения для расчета предельных вероятностей состояний:

$$\begin{cases} P_1 = \rho / 1! P_0, \\ P_2 = \rho^2 / 2! P_0, \\ P_n = \rho^n / n! P_0, \\ P_{n+1} = \rho^{n+1} / n! n P_0, \end{cases} \quad (4.26)$$

$$P_0 = \left[1 + \rho + \rho^2 / 2! + \dots + \rho^n / n! \frac{\rho/n - (\rho/n)^{m+1}}{1 - \rho/n} \right]^{-1}, \quad (4.27)$$

где $\rho = \lambda / \mu$.

Найдем, используя известные результаты, приведенные для СМО в [47], основные параметры эффективности СТЭЛСС.

Вероятность отказа заявки определится значением P_{m+n} , соответствующей вероятностью, что все n каналов и m мест в очереди заняты:

$$P_{\text{отк}} = P_{m+n} = (\rho^{n+m} / n! n^m) P_0. \quad (4.28)$$

Абсолютная пропускная способность СЭЛСС

$$Q = \lambda(1 - P_{\text{отк}}) = \lambda[1 - (\rho^{n+m} / n! n^m) P_0]. \quad (4.29)$$

Среднее число занятых каналов равно отношению абсолютной пропускной способности СЭЛСС к производительности одного канала

$$Z_{\text{ср}} = Q / \mu = \rho [1 - (\rho^{n+m} / n! n^m) P_0]. \quad (4.30)$$

Среднее число заявок в очереди можно вычислить как математическое ожидание дискретной, случайной величины, умножая любое возможное число заявок на вероятность того, что именно это число заявок будет в очереди, и складывая полученные суммы:

$$R_{\text{ср}} = 1P_{n+1} + 2P_{n+2} + \dots + mP_{n+m} = (\rho^{n+1} / n! n) P_0 [1 + 2\rho/n + 3(\rho/n)^2 + \dots + m(\rho/n)^{m-1}] \quad (4.31)$$

или

$$R_{\text{ср}} = (\rho^{n+1} / n! n) P_0 [1 - (m+1)q^m + mq^{m+1}] / (1-q)^2, \quad (4.32)$$

где $q = \rho/n$.

Среднее число заявок, находящихся в системе, $k_{\text{ср}} = Z_{\text{ср}} + R_{\text{ср}}$.

Значение среднего времени ожидания определяется умножением среднего времени нахождения заявок в состоянии i , где $i \geq n$ – число каналов, равное $1/n\mu$, на соответствующую вероятность:

$$\begin{aligned} T_{\text{ср ож}} &= (1/n\mu) P_n + (2/n\mu) P_{n+1} + \dots + (m/n\mu) P_{n+m-1} = \\ &= (\rho^n / n! n\mu) P_0 [1 + 2\rho/n + 3\rho^2/n^2 + \dots + m\rho^{m-1} / n^{m-1}]. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Значение $T_{\text{ср ож}}$ можно выразить через параметр $q = \rho/n$:

$$T_{\text{ср ож}} = (\rho^n / n! n\mu) P_0 [1 - (m+1)q^m + mq^{m+1}] / (1-q)^2. \quad (4.34)$$

Среднее время пребывания заявки в системе

$$T_{\text{ср сист}} = T_{\text{ср ож}} + T_{\text{ср в}}. \quad (4.35)$$

Таким образом, математическая модель, рассмотренная в подразд. 4.2, позволяет теоретически оценить эксплуатационные параметры линейного

тракта кабельной магистрали, например, до и после реконструкции выполненной тем или иным способом, с точки зрения вероятности безотказной работы и производительности магистрали, используя оценочные значения интенсивности потока отказов оборудования линейного тракта.

При этом можно рассматривать вопрос стоимости проведения реконструкции, обеспечивающей требуемые значения вероятности безотказной работы.

Рассмотренная в настоящем разделе математическая модель СТЭЛСС позволит установить соотношения и рассчитать средние значения параметров эффективности одноканальных и многоканальных СТЭЛСС в течение длительного времени (год и более), когда вероятности состояний СТЭЛСС принимают свои предельные значения. Эти параметры целесообразно назвать статическими.

Во многих случаях важно знать параметры СТЭЛСС в течение относительно небольшого отрезка времени, характеризующего работу СТЭЛСС в особых условиях. Эти условия возникают на многих магистралях или на их отдельных участках во время сезона максимальной грозовой деятельности, усиления интенсивности оползней почвы и селей в горной местности, весенних паводков, проведении интенсивных земляных или иных строительных работ в районе прохождения магистрали.

Параметры, определяемые в относительно небольшие периоды работы магистрали, характеризующиеся экстремальным состоянием СТЭЛСС, целесообразно назвать динамическими. Для их определения воспользуемся приведенной моделью и полученными соотношениями с тем отличием, что в качестве исходных параметров (λ и μ) необходимо использовать параметры, полученные в экстремальных условиях работы СТЭЛСС.

В качестве примера рассмотрим эффективности одноканальной и многоканальной СТЭЛСС.

Пусть имеется условная магистраль протяженностью 1500 км, которая состоит из 15 участков ОРП-ОРП. Каждый из участков, протяженностью 100 км, обслуживается одной группой ремонтных рабочих, устраняющих повреждения как кабеля, так и линейных сооружений, и работающих независимо друг от друга, т.е. участок ОРП-ОРП представляет собой одноканальную СТЭЛСС.

Поток повреждений имеет среднее значение интенсивности отказов с перерывом связи на участке ОРП-ОРП: $\lambda=9,7 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; время восстановления

$T_{\text{ср в}} = 6,5$ ч (для ВОЛС можно положить 16 ч).

Определить:

пропускную способность СТЭЛСС;

среднее число заявок, находящихся в очереди на обслуживание;

среднее число заявок, находящихся в СЭЛСС (включая ремонт);

среднее время ожидания заявки в очереди;

среднее время пребывания заявки в СЭЛСС.

В данном примере определяются статические параметры СТЭЛСС, так как $\lambda \ll \mu$ или $T_{\text{ср о}} > T_{\text{ср в}}$.

Из (4.11) находим производительность СЭЛСС: $\mu = 1/T_{\text{в ср}} = 0,154$ 1/ч.

Из (4.13) вычисляем параметр: $\rho = \lambda/\mu = 6,3 \cdot 10^{-5}$.

По формулам (4.14) при $\rho \ll 1$ рассчитываем вероятности состояний с погрешностью $\varepsilon < P_0 \cdot 10^{-6}$: $P_0 = 0,99937$; $P_1 = 6,296 \cdot 10^{-5}$; $P_2 = 39,67 \cdot 10^{-10}$.

Пропускную способность СТЭЛСС определяем по (4.29), полагая $n=1$, $m = 1 - Q = \lambda(1 - P_{\text{отк}}) = 9,7 \cdot 10^{-6}$.

Среднее число заявок, находящихся в очереди, подсчитываем по (4.19): $R_{\text{ср отк}} = \rho^2/(1 - \rho) = 3,97 \cdot 10^{-6}$.

Среднее число заявок, находящееся в СТЭЛСС из (4.20):

$$K_{\text{ср отк}} = R_{\text{ср}} + \rho = 6,3 \cdot 10^{-5} \approx 0.$$

Среднее время ожидания заявки в очереди вычисляем по (4.23):

$$T_{\text{ср ож.отк}} = \rho/\mu(1 - \rho) = 4 \cdot 10^{-4} \text{ ч.}$$

Среднее время нахождения заявки в СТЭЛСС определяем по (4.24):

$$t_{\text{сист}} = 1/\mu(1 - \rho) \approx 6,5 \text{ ч.}$$

Из данного примера видно, что после проведения мероприятий по реконструкции магистрали очередь в СТЭЛСС практически отсутствует, число заявок стремится к нулю, а среднее время нахождения заявки в системе совпадает с временем восстановления тракта.

Для реконструированных магистралей, когда вместо линейных трактов аналоговых систем передачи организованы тракты цифровых систем, например, РСМ-480, LS-34, LA-140*2, и появляется значительное число необслуживаемых регенерационных пунктов, эффективность СТЭЛСС одноканального уровня не может, как правило, обеспечить удовлетворительные характеристики по пропускной способности, времени ожидания заявки в очереди и др.

В следующем примере рассмотрим трехканальную СТЭЛСС. Это означает, что на участке ОРП-ОРП такой же протяженностью в 100 км обслу-

живание производится не одной, как в предыдущем примере, а тремя ремонтными бригадами, действующими самостоятельно и с одинаковой производительностью. Допустимая длина очереди $m=3$. Предположим, что система СТЭЛСС работает в динамическом режиме, обусловленным внешними факторами, которые приводят к росту числа отказов (сезонные перемещения грунта, активизация грозодеятельности и пр.).

• Находим производительность СТЭЛСС, интенсивность потока отказов в динамическом режиме при среднем числе повреждений в этот период – 35, среднее время восстановления связи по постоянным схемам примем равным 54 ч, а также вычисляем параметры ρ_d при $\mu_d=1/T_{в.ср.}=1,85 \cdot 10^{-2}$ ч, $\lambda_d=2,35 \cdot 10^{-2}$ 1/ч, получим $\rho_d=\lambda_d/\mu_d=1,27$. Параметр $\rho_d > 1$, следовательно, процесс не является сходящимся, т. е. в течение данного отрезка времени число заявок в очереди СТЭЛСС возрастает.

- Вычисляем параметр: $q=\rho/n - q=0,423$.
- Находим предельные вероятности (4.27): $P_{0d} \approx 0,3$.
- Вероятность отказа (4.28): $P_{отк}=1,8 \cdot 10^{-2}$.
- Абсолютная пропускная способность СТЭЛСС:

$$Q=\lambda(1-P_{отк})=2,35 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ч.}$$

- Среднее число заявок в очереди (4.32):
 $R_{ср}=(\rho^{n+1}/n!n)P_0[1-(m+1)q^m+m q^{m+1}]/(1-q)^2 \approx 8,3 \cdot 10^{-2}$.
- Среднее число заявок, находящихся в СТЭЛСС: $k_{ср.}=Z_{ср.}+R_{ср.}=1,351$.
- Среднее время ожидания по (4.34):
 $T_{ср.ож}=(\rho^n/n!n\mu) P_0[1-(m+1) q^m+ m q^{m+1}]/(1-q)^2=3,46$ ч.
- Среднее время пребывания заявки в системе:

$$t_{сист.д.}=T_{ср.ож}+T_{ср.в} \approx 58 \text{ ч.}$$

Сравнение полученных результатов показывает, что эффективность работы СТЭЛСС с увеличением числа каналов обслуживания в системе (ремонтных и эксплуатационных) существенно возрастает. Однако увеличение числа каналов связано напрямую с увеличением эксплуатационных расходов, поэтому на практике число каналов обслуживания, определяемое, в конечном счете, численностью эксплуатационного персонала, должно согласовываться со степенью повышения эффективности работы СТЭЛСС.

Рассмотренные математические модели позволяют с достаточно большой степенью вероятности оценить варианты реконструкции действующих

магистралей, проводимой как для расширения пропускной способности последних, так и повышения эксплуатационной надежности и эффективности системы технической эксплуатации.

В настоящее время могут рассматриваться три основных варианта проведения реконструкции:

- организация более мощных цифровых систем передачи по существующим металлическим кабельным линиям связи;
- построение составных линейных трактов путем введения волоконно-оптических линий;
- строительство новых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), как правило, параллельно существующим трассам металлического кабеля.

Одним из основных критериев выбора того или иного способа проведения реконструкции является, с одной стороны, возрастание трафика на данном направлении, а с другой – какими средствами это достигается. Как следует из рассмотренной выше математической модели, эффективность мероприятий по реконструкции возрастает по всем показателям, когда в результате реализации проекта достигается уменьшение интенсивности потока отказов λ и увеличение параметра $\mu=1/T_{в. ср.}$. Изменение данных параметров в указанную сторону приводит к возрастанию вероятности безотказной работы и коэффициента готовности, снижению среднего времени ожидания, среднего времени восстановления связи, уменьшению вероятности появления отказов.

Рассматривая возможные варианты проведения реконструкции можно выделить три основных момента:

- при организации трактов ЦСП по существующим металлическим кабелям длина участков регенерации существенно сокращается по сравнению с длиной усилительного участка, появляется много дополнительного активного оборудования (линейные регенераторы) и, соответственно, растут эксплуатационные расходы;
- построение составных линейных трактов позволяет на отдельных участках магистрали сократить количество активного оборудования, что, естественно, приводит к повышению эффективности СТЭЛСС;
- строительство новых ВОЛС позволяет полностью отказаться от промежуточных необслуживаемых пунктов, что при высокой надежности самого оптического кабеля сокращает затраты на эксплуатацию линейного тракта.

Однако в этом случае затраты на оптический кабель и строительство могут быть существенно выше, чем в первом случае.

4.4. Эксплуатационные бригады: формирование, квалификация и оснащение

В соответствии с основными теоретическими положениями, позволяющими оценить эффективность построения системы эксплуатации, разработаны основные положения по формированию ремонтных кабельных бригад и бригад по обслуживанию и проведению профилактических работ на ВОЛС. Разработаны основные требования к ним [10].

Технический персонал бригады по обслуживанию ВОЛС обязан знать:

- правила технической эксплуатации, руководства, инструкции, рекомендации, директивные указания по вопросам технической эксплуатации линейного и станционного оборудования;
- теоретические основы волоконно-оптической техники и аппаратуры системы передачи PDH, SDH, в том числе основные параметры волоконно-оптических кабелей, оптических волокон, муфт, кроссового оборудования, мультиплексоров, источников питания, алгоритмы работы системы управления сетью, систем мониторинга (если она установлена);
- методы измерения параметров ВОК и аппаратуры PDH, SDH;
- схемы организации связи на участках сети, электропитания и прохождения линейных трактов по узлам;
- трассы прохождения по участкам с привязкой к местности;
- схемы подъезда (подхода) к трассе;
- систему крепления ВОК на опорах, конструкции муфт, оптических и электрических кроссов, мультиплексоров, источников питания и правила их монтажа;
- технологию выполнения работ при снятии и подвеске ВОК на опорах контактной сети, иметь соответствующие документы допуска на работы на контактных сетях или высоковольтных ЛЭП;
- персональный компьютер и порядок инсталляции сетевых мультиплексоров с его помощью;
- общие правила технической эксплуатации, существующие в той отрасли или ведомстве (например, РОСТЕЛЕКОМ, ЭЖД или Газпром), которой принадлежит конкретная ВОЛС, систему организации аварийно-восстановительных работ, порядок оповещения, сбора и следования бригады к месту работ;
- требования правил техники безопасности как в части обслуживания ВОЛС, так и при работах в зоне расположения основной транспортной

системы;

- эксплуатационную документацию, связанную с обслуживанием ВОЛС и аппаратуры PDH или SDH.

Обслуживающий ВОЛС персонал должен иметь:

- практические навыки в работах по разделке и сращиванию волоконно-оптического кабеля как механическими соединителями, так и способами сварки;
- опыт работы с необходимой контрольно-измерительной и сварочной техникой;
- опыт настройки и регулировки мультиплексоров PDH, SDH, оборудования электроснабжения;
- права на управление автомобилем (желательно категории «С»);
- персональное удостоверение об окончании соответствующих курсов от организаций, имеющих лицензию на обучение;
- право допуска к самостоятельной работе в условиях, соответствующих особенностям эксплуатации основных объектов отрасли (ведомстве);
- ежегодное переосвидетельствование знаний правил электробезопасности, ПТЭ и ПУЭ.

*Принципы формирования эксплуатационных участков (бригад)
по обслуживанию ВОЛС и их состав*

На этапе проектирования и строительства как магистральных участков цифровой сети связи федерального значения, так и внутрizonовых или региональных ВОЛС предполагается создать два типа эксплуатационных участков (бригад):

- базовая эксплуатационная бригада, обеспечивающая взаимодействие со структурами служб оперативного управления (СОУ) сети связи магистрального уровня, должна создаваться при каждом региональном операторе;
- линейные эксплуатационные бригады регионального (зонального) оператора.

Базовая бригада от линейной отличается составом оборудования и транспортных средств.

Основными задачами данных подразделений, осуществляющих техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений и промежуточных мультиплексоров ввода-вывода или регенераторов в пределах установленного участка, являются:

- обеспечение надежной и высококачественной работы обслуживае-

мых сооружений и оборудования;

- содержание линейных сооружений и оборудования в соответствии с техническими нормами и требованиями;
- своевременное и высококачественное проведение работ по ремонту и повышению надежности линейных сооружений;
- проведение работ по обеспечению сохранности линейно-кабельных сооружений (ЛКС);
- обеспечение выполнения действующих положений, правил, руководств, инструкций, приказов и директивных указаний по вопросам технической эксплуатации линейных сооружений и сетевого оборудования;
- проведение работ по сбору статистических данных о состоянии ЛКС;
- ведение производственной деятельности и статистической отчетности в соответствии с утвержденными отраслевыми или ведомственными нормами и инструкциями.

В дополнение к этому, на период строительства, бригады непосредственно участвуют в строительномонтажных и пусконаладочных работах и выполняют функции технического надзора за ходом строительства.

Базовые бригады оснащаются более сложной измерительной техникой, комплектуются высококвалифицированными специалистами и, в перспективе по завершении строительства, трансформируются в производственные лаборатории региональных операторов.

В дальнейшем, к вышеуказанным функциям как в период строительства, так и при последующей эксплуатации, на них возлагаются задачи подготовки кадров и формирования линейных бригад, их оснащение транспортом, механизмами, оборудованием, материалами и измерительной техникой, а также:

- проведение плановых измерений параметров волоконно-оптических линий связи, составление паспортов линейного и сетевого оборудования;
- осуществление метрологического надзора за правильной эксплуатацией измерительных приборов, организация и проведение их поверки в установленные сроки и обеспечение замены в случае несоответствия их параметров современным требованиям, возникающим в процессе развития сети и перехода к более современному оборудованию;
- участие в приемке в эксплуатацию пусковых комплектов при строительстве ВОЛС;
- проведение анализа производственных процессов и внесение пред-

ложений по улучшению организации технической эксплуатации, участие в разработке нормативных документов, рекомендаций, инструкций, руководств и технологических карт;

- изучение научно-технической информации по вопросам технической эксплуатации, обеспечение внедрения новой техники, предложений и рекомендаций, направленных на совершенствование эксплуатационной работы.

В качестве примера можно привести структуру формирования эксплуатационных бригад в системе ЭЖД, в частности ЗАО «ТрансТелеКом».

На этапе формирования системы эксплуатации ВОЛС базовые эксплуатационные бригады формируются на железных дорогах и переводятся в прямое подчинение Управления эксплуатации ЗАО «ТрансТелеКом» с последующим переводом в штат его филиалов на дорогах.

Штат эксплуатационных участков (бригад)

В зависимости от масштабов зон обслуживания и от технической оснащенности участка обслуживания средствами связи состав бригад по обслуживанию ВОЛС может меняться. Оптимальной можно считать бригаду из 5 чел., при ее оснащении легковым автомобилем с прицепом или УАЗ-452 в следующем составе:

- начальник участка эксплуатации ВОЛС – 1 чел.;
- инженер-измеритель ВОК – 1 чел.;
- электромеханик линейно-кабельного оборудования – 1 чел.;
- инженер-измеритель PDH, SDH – 1 чел.;
- электромеханик сетевого оборудования – 1 чел.

Каждый из членов бригады должен уметь выполнять элементарные операции по измерениям ВОК и оборудования PDH, SDH, а также по сращиванию и монтажу ВОК. Обязательным условием является наличие прав на управление автомобилем не менее чем у 3 чел.

При оснащении бригады грузовым автомобилем или автотрисой в состав бригады включаются водитель и его дублер.

Штат базовых бригад определяется в зависимости от конкретных объемов строительства ВОЛС и не может составлять менее 5 чел. (по аналогии с линейной бригадой).

Помещение для хранения материалов должно быть оборудовано охранно-пожарной сигнализацией, так же как и гаражи для стоянки транспортных средств.

Ответственность за сохранность и комплектность оборудования возла-

гается на начальника участка эксплуатации ВОЛС.

В заключение необходимо сказать, что система эксплуатации и технического обслуживания должна создаваться на единых принципах и, развиваясь далее, сохранять организационно-техническое единство, отвечать международным нормам, обеспечивать высокие параметры качества и надежности связи и быть адаптированной к любым структурным изменениям управления, а также требованиям потребителей услуг цифровой телекоммуникационной сети, выполнять задачи, возникающие в связи с развитием и построением мультисервисных сетей. Прежде всего, это новое активное оборудование, обеспечивающее весь комплекс современных услуг связи – Интернет, цифровое ТВ-вещание, мультимедийные опции и т. п., которое требует от кабельной техники все большей полосы частот.

Основной целью системы технического обслуживания должна быть минимизация как случаев возникновения, так и влияния отказов на объем трафика с тем, чтобы в случае отказа подготовленный персонал мог быть направлен на выявленное место аварии с необходимым оборудованием, имея достоверную информацию для проведения конкретной работы в установленные сроки.

Конечной целью эксплуатации и технического обслуживания должна быть минимизация общих затрат на содержание сети в течение всего срока ее эксплуатации, складывающихся из капитальных затрат, затрат на использование по назначению, техническую эксплуатацию и потерь доходов за счет перерывов трафика.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАГИСТРАЛЕЙ, ТРАКТОВ ПЕРВИЧНОЙ СЕТИ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОКРАЩЕНИЮ ВРЕМЕНИ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Мероприятия по оптимизации и повышению эффективности работы системы технической эксплуатации линейных сооружений связи можно разделить на две большие группы:

- организационные мероприятия, заключающиеся в улучшении системы и структуры эксплуатационной службы кабельных магистралей (КМ), повышении квалификации обслуживающего персонала, что особенно важно в структуре эксплуатации ВОЛС и т.п.;
- мероприятия технического характера, состоящие в разработке и внедрении новых методов и устройств, обеспечивающих улучшение эксплуатационных и технических характеристик подсистем магистральной связи.

Выбор критериев оптимизации СТЭЛСС и разработка технических мероприятий для регионов должны базироваться на основе статистических исследований повреждений КМ.

5.1. Анализ причин повреждения КМ и основные параметры СТЭЛСС

Основной задачей СТЭЛСС является обеспечение бесперебойной работы трактов и каналов при заданном качестве передачи информации и минимальных эксплуатационных расходах. Данная задача решается в условиях воздействия на ЛСС различных дестабилизирующих факторов, приводящих к возникновению отказов, ухудшающих качество передачи информации.

Отказы и неисправности на ЛСС могут возникать в любой момент времени, образуя случайный процесс – поток отказов.

Одним из основных параметров оценки качества работы КМ является плотность повреждений [10, 13, 19, 48] (плотность отказов), приходящихся на 100 км трассы в год:

$$n = \frac{100N}{KL}, \quad (5.1)$$

где N – число отказов на магистрали связи длиной L за K лет.

Значение n может определяться раздельно для отказов:

- всех видов, возникающих в системе ЛСС;
- приводящих к перерыву связи;
- вызывающих неисправности;

- только линии связи;
- только станционных устройств;
- различных подсистем ЛСС и т.д.

Данное разделение при определении плотности отказов обусловлено необходимостью определять параметры надежности тех или иных подсистем служб эксплуатации.

Кроме плотности повреждений важной характеристикой эффективности и качества работы КМ является интенсивность отказов, определяемая средней плотностью отказов на 1 км трассы КМ в час:

$$\Lambda_{\text{ср}} = \frac{n}{100 \cdot 8760}, \quad (5.2)$$

где 8760 – число часов в году, 100 – протяженность трассы, км.

Значения интенсивности потока отказов на отдельных участках магистрали могут существенно различаться в зависимости от условий эксплуатации на этих участках. Кроме того, существует зависимость $\Lambda_{\text{ср}}$ от времени года [10, 52].

Для однотипной КМ протяженностью L при постоянных условиях эксплуатации интенсивность потока отказов

$$\lambda = \Lambda_{\text{ср}} \cdot L. \quad (5.3)$$

Для КМ, состоящей из участков с различными средними значениями интенсивности отказов $\Lambda_{\text{ср}1}, \Lambda_{\text{ср}2}, \dots, \Lambda_{\text{ср}i}$, интенсивность потока отказов

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \Lambda_{\text{ср}i} \cdot L_i. \quad (5.4)$$

Вероятность безотказной работы за время t определяется, как показывают экспериментальные исследования [52], показательной функцией

$$P = e^{-\lambda t}, \quad (5.5)$$

откуда получим, что плотность распределения случайной величины – времени t безотказной работы – подчиняется закону Пуассона:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}. \quad (5.6)$$

Отказы на КМ могут возникать как в результате внешних воздействий, так и от внутренних причин. Проведем анализ статистических данных по распределению причин повреждений.

По данным статистики, отсутствие связи из-за повреждения кабелей, выраженный в канало-часах, составляет значительный процент по сравнению

с простом из-за стационарных повреждений.

Причины повреждений весьма разнообразны. Общее представление о повреждениях на первичной сети можно получить из анализа статистики материалов по отказам за достаточно большой период (данные МС СССР и далее ОАО «РОСТЕЛЕКОМ»).

Прежде всего, причины повреждений, которые чаще всего фигурируют в отчетах:

- дефекты строительства и монтажа;
- механические воздействия;
- неправильная эксплуатация;
- коррозия как металлических оболочек кабеля, так и пластмассовых оболочек воздушных ВОК, особенно под воздействием солнечной радиации;
- пробой высоким напряжением, в том числе от токов молнии;
- сдвиг и давление почвы;
- повреждения от грызунов;
- старение;
- прочие.

На диаграммах (рис. 5.1 и 5.2) представлена статистика повреждений, от перечисленных выше причин, по магистралям Северо-Западного региона. Эта статистика характерна для Европейской части России, поэтому она должна быть принята во внимание при разработке различных проектов по СТЭЛСС.

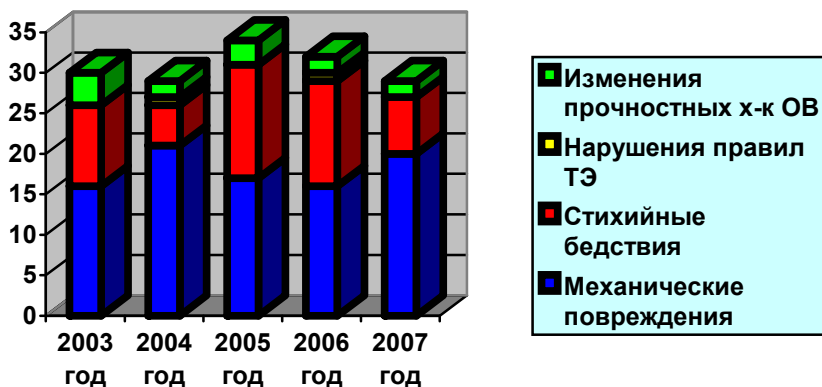


Рис. 5.1. Статистика повреждений

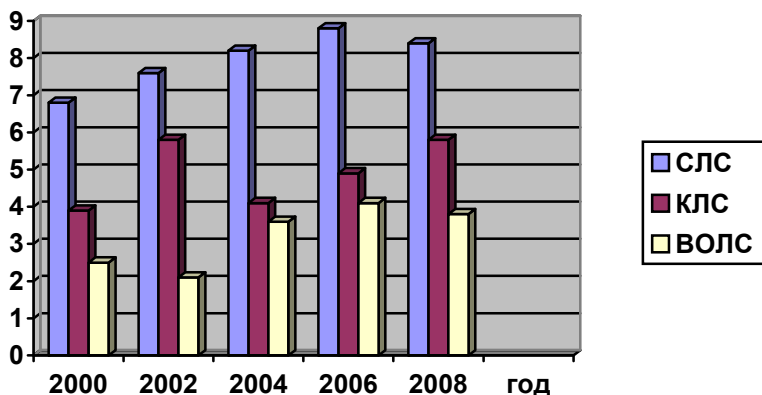


Рис. 5.2. Распределение повреждений по различным линиям связи

При этом средняя протяженность ЛС, организованных по симметричным кабелям СЛС=1800 км; по коаксиальным КЛС=1400 км и протяженность ВОЛС=1800 км. Это, можно сказать, суммарная протяженность участков сети с учетом магистральных, внутризоновых и сельских линий.

Ясно, что количество повреждений техногенного характера (работа сторонних организаций, воровство кабелей и т.п.), которые составляли не более 30% всех повреждений механического характера, в настоящее время приближаются к 50%, причем тенденция к их росту сохраняется на протяжении последних лет.

Процесс устранения отказов на КМ характеризуется средним временем восстановления $T_{ср в}$, которое складывается из среднего времени обнаружения неисправности $T_{ср о}$ среднего времени определения характера и места повреждения $T_{ср изм}$ и среднего времени ремонта $T_{ср рем}$. В случае повреждения кабельной линии или НРП (НУП) к этим составляющим добавляется еще время, необходимое для прибытия аварийной бригады $T_{ср тр}$ на место повреждения линии.

Таким образом,

$$T_{ср в} = T_{ср о} + T_{ср изм} + T_{ср рем} + T_{ср тр}. \quad (5.7)$$

Уравнение (5.7) позволяет определить основные пути уменьшения времени восстановления повреждений кабелей связи в структуре СТЭЛСС.

Для КМ время восстановления много меньше времени безотказной работы T_0 , из этого следует, что $\lambda \approx 1/T_0$ и восстановление исправного состояния КМ происходит в течение случайного времени $T_{\text{ср.в}}$, распределенного по показательному закону с параметром $\mu = 1/T_{\text{ср.в}}$ и плотностью $\Psi(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$.

Параметр μ называют производительностью подсистемы восстановления работы кабельных магистралей (ф-ла (4.11) разд. 4.3), так как он равен числу устраняемых отказов в единицу времени.

Причины повреждения ВОЛС идентичны повреждениям на металлических линиях, особенно это касается повреждений механического характера.

Установлены также и отличия, связанные с принципами распространения сигнала по волокну, определяемые параметрами оптических волокон.

Одним из основных параметров надежности КМ является коэффициент готовности K_{Γ} , который определяется как отношение суммарного времени исправной работы КМ к общему времени наблюдений [10, 52]. Этот параметр учитывает все составляющие системы эксплуатации и может быть рассчитан для каждой подсистемы отдельно:

$$K_{\Gamma} = \frac{\left(T_0 - \sum_{i=1}^n T_n \cdot n_i \right)}{T_0} = \frac{\left(T_0 - T_{\text{ср.в}} \cdot n \right)}{T_0}. \quad (5.8)$$

Оценочный расчет показателей надежности, выполняемый на стадии проектирования, для магистралей первичной сети при различной протяженности тракта должен соответствовать значениям, приведенным в табл. 5.2–5.4, которые являются целевыми [10].

Таблица 5.2

Для местной первичной сети $L_{\text{мпс}} \approx 200$ км

Показатель надежности	Канал ГЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,997	>0,9994	>0,9987
Среднее время между отказами, ч	>400	>7000	>2500
Время восстановления, ч	<1,1	<4,24	См. прим.

Таблица 5.3

Для внутризоновой первичной сети $L_{впс}=1400$ км

Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,99	>0,998	>0,99
Среднее время между отказами, ч	>111,4	>2050	>350
Время восстановления, ч	<1,1	<4,24	См. прим.

Таблица 5.4

Для магистральной первичной сети $L_{мгпс}=12500$ км

Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,92	>0,982	>0,92
Среднее время между отказами, ч	>12,54	>230	>40
Время восстановления, ч	<1,1	<4,24	См. прим.

Примечание. Для оборудования линейных трактов время восстановления должно лежать в пределах следующих значений:

- необслуживаемого регенерационного пункта T_B (НРП) < 2,5 ч (в том числе время подъезда – 2 ч);
- обслуживаемого регенерационного пункта и оконечного пункта T_B (ОРП) < 0,5 ч;
- симметричного кабеля в зависимости от типа и емкости T_B (СК) в пределах 6–8 ч (в том числе время подъезда – 2 ч);
- коаксиального кабеля в зависимости от типа и емкости T_B (КК) в пределах 4,6–8,8 ч (в том числе время подъезда – 2 ч);
- оптического кабеля в зависимости от типа и емкости T_B (ОК) в пределах 10–16 ч (в том числе время подъезда – 3,5 ч).

Реальные значения продолжительности повреждений и времени восстановления для ВОЛС, представлены на диаграмме рис. 5.3.

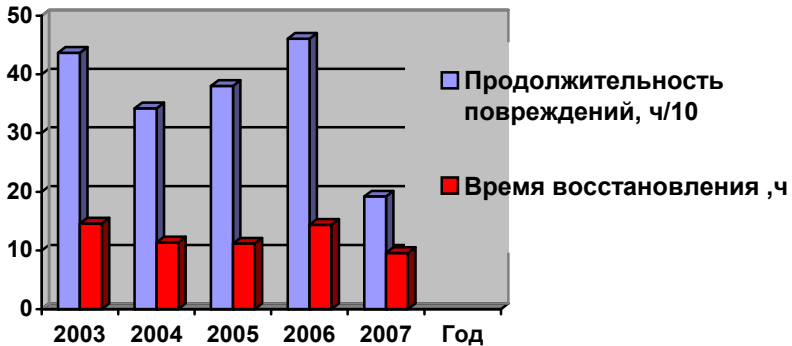


Рис. 5.3. Статистика восстановления ВОЛС

Рассчитывая среднее значение интенсивности отказов λ за год на 100 км кабельной линии в соответствии с выражением (5.3) для реальных значений отказов, приведенных на диаграммах, получаем:

$$\lambda_{\text{слс}}=0,62; \lambda_{\text{клс}}=0,91, \lambda_{\text{волс}}=0,5.$$

При этом полученные значения интенсивности отказов различны ввиду различной протяженности КМ и, как следствие, различного количества простоев рассматриваемых магистралей.

Расчет среднего значения коэффициента готовности реальных кабельных магистралей с учетом среднего времени восстановления, значения которого приведены в табл. 5.2–5.4, получится равным:

$$K_{\Gamma}=0,994 \text{ (СЛС)}, K_{\Gamma}=0,996 \text{ (КЛС)}, K_{\Gamma}=0,996 \text{ (ВОЛС)}.$$

Полученные значения для сравнения со значениями коэффициента готовности, рекомендованными в табл. 5.2–5.4, с учетом соответствующих длин линейных трактов могут быть пересчитаны путем вычисления числа повреждений, приходящихся на 100 км трассы КМ, и умножения на соответствующую длину:

- на местной первичной сети: $K_{\Gamma\text{слс}} = 0,987$, $K_{\Gamma\text{клс}} = 0,989$, $K_{\Gamma\text{волс}} = 0,992$;
- на внутризоновой первичной сети: $K_{\Gamma\text{слс}} = 0,982$, $K_{\Gamma\text{клс}} = 0,984$, $K_{\Gamma\text{волс}} = 0,986$;
- на магистральной первичной сети: $K_{\Gamma\text{слс}} = 0,86$, $K_{\Gamma\text{клс}} = 0,864$, $K_{\Gamma\text{волс}} = 0,862$.

Сравнивая расчетные средние значения коэффициентов готовности с

рекомендованными и полученными на основе анализа статистической модели, можно сделать вывод, что реальные их значения достаточно далеки от рекомендуемых, и поэтому вызывает необходимость поиска путей повышения значений последних.

5.2. Основные факторы воздействий на ВОЛС в процессе производства, строительства и эксплуатации

В качестве иллюстрации перечисленных выше положений, можно привести некоторые примеры воздействий на те или иные ВОЛС и проблемы, возникающие в процессе эксплуатации [41, 42, 49, 51].

Оптическое волокно становится ключевым элементом построения современных линий связи и сетей широкополосного доступа. При этом важным требованием, предъявляемым к ВОЛС, является требование к их долговечности.

Однако для увеличения срока службы оптического волокна необходимо выполнить ряд условий в процессе его *производства, строительства и эксплуатации.*

В процессе производства главное – отсутствие механических напряжений, которые могут возникать в волокне.



Рис. 5.4. Вытяжка оптических волокон из заготовки

Возможные причины появления механических напряжений внутри оптического волокна – нарушение технологического процесса производства оптоволоконного кабеля.

В результате нарушения технологии изготовления заготовки или в процессе вытяжки волокна в нем могут возникнуть локальные «вмороженные» неоднородности кварца, которые и являются центрами внутренних напряжений.

Подобные напряжения делают оптическое волокно уязвимым даже к небольшим по амплитуде вибрациям или изгибам.

Кроме того, могут иметь место нарушения в технологии производства самого кабеля, в результате чего условие свободной укладки волокон в модулях может быть нарушено (рис. 5.4). В этой связи хочется обратить внимание, что использующийся многими кабельными заводами метод фазового

набега для контроля механического напряжения оптических волокон в кабеле дает некорректные результаты. Это можно увидеть из результатов теста, который проводила компания Swisscom (графики рис. 5.5).

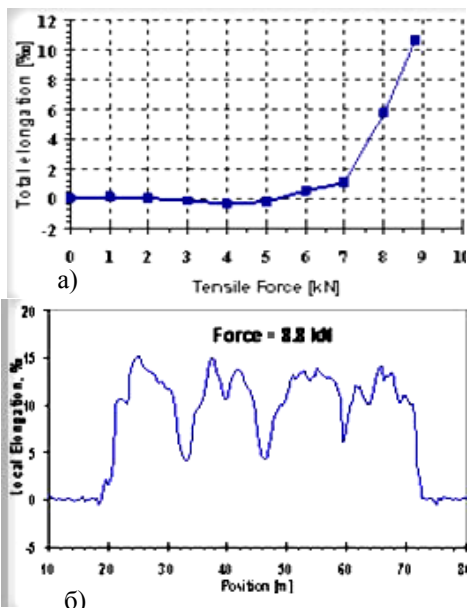


Рис. 5.5. При укладке ВОК на барабан кабель может испытывать различные нагрузки:
 а – измеренные методом фазового набега,
 б – измеренные бриллиантовым рефлеректометром

Важным достоинством волоконно-оптических линий связи является их потенциальная долговечность. Однако для обеспечения долговечной работы необходимы соответствующие условия и главное из них — отсутствие механических напряжений в волокне. Повышенное натяжение волокна в кабеле вызывает деградацию его прочностных характеристик, что, в конце концов, приводит к разрыву волокна. Даже незначительное увеличение натяжения волокна может привести к многократному уменьшению его срока службы. Поэтому надежность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о натяжении волокна в кабеле. Обычные оптические рефлектометры не в состоянии определить натяжение волокна, поскольку величина оптических потерь при возникновении напряжений в волокне, как правило, остается в пределах нормы вплоть до момента наступления необратимых изменений в волокне.

Рефлектометр Brillouinский ANDO AQ8603 [18, 31, 32, 43].

Созданный на острие передовых технологий новый Brillouinский рефлектометр AQ8603 (рис. 5.6) предназначен для обнаружения и анализа механических напряжений волокна в оптическом кабеле как в процессе его производства, так и в процессе его прокладки и эксплуатации. Значительно возросшая по сравнению с предыдущей моделью точность измерений напряжения в волокне позволяет с высокой достоверностью определить надежность оптического кабеля и вовремя предотвратить ухудшение связи и разрыв волокна. Качество этого прибора делает его незаменимым инструментом на предприятиях по производству оптического кабеля и для крупных операторов связи, масштабы сетей и объемы передачи информации которых определяются вопросами качества и надежности связи.

Области применения. Оценка качества прокладки и долговечности оптической линии.

Контроль надежности и мониторинг эксплуатируемых оптических линий. Анализ распределения потерь и внутренних напряжений при производстве оптического кабеля. Исследования и разработки в области оптических кабелей. Исследования чувствительности оптического волокна к различным факторам (изменение температуры, натяжение, изгиб).



Рис. 5.6. Рефлектометр Brillouinский

Основные характеристики

- относительная погрешность измерения механических напряжений: $\pm 0,003\%$;
- разрешение считывания: 0,0001% по напряжению, 5 см по расстоянию;
- пространственное разрешение: не более 1 м;
- динамический диапазон: не менее 15 дБ;
- диапазон измеряемых длин кабеля: до 55 км;
- анализ результатов:
 - распределение напряжений по длине линии;
 - спектральное распределение Brillouinского рассеяния;
 - распределение оптических потерь и другие функции.

Видно, что значения на графике (рис. 5.5, а) могут быть гораздо ниже, чем реальное распределенное локальное напряжение (рис. 5.5, б). Это связано с тем, что кабель на подобной установке испытывает различное натяжение (нагрузку) на катушке по сравнению с прямыми участками, в то время как метод фазового набега дает усредненное значение напряжения волокна.

В процессе строительства. Это нарушение норм, регулирующих процессы прокладки оптического кабеля. К сожалению, избежать оплошностей и ошибок при прокладке кабеля невозможно.

Все изгибы кабеля с радиусом меньше рекомендованной величины, различного рода защемления или неправильный крепеж обернутся в итоге повышенным натяжением волокна в кабеле и его преждевременным разрушением.

Безусловно, отдельно нужно рассматривать вопросы надежности при строительстве ВОЛС различными способами: путем прокладки кабеля в грунт, защитную трубу, воздушные способы, в основных вариантах – это подвеска ВОК в грозозащитном тросе, самонесущий ВОК, навивная технология, так как факторы, влияющие на стабильность параметров ВОЛС, в этих вариантах разные.

При прокладке кабеля в грунт – это, прежде всего, подготовленность траншеи, отсутствие в ней различных неоднородностей – камней, уплотнений грунта, посторонних предметов и т. п. (рис. 5.7). Необходимо учитывать возможность смещения слоев грунта (рис. 5.8) в результате его вспучивания (таяние вечной мерзлоты, селевые потоки, оползни и пр.). Прокладка ВОК в



Рис. 5.7. Прокладка ВОК в плохо подготовленную траншею



Рис. 5.8. Перемещение грунта в результате землетрясения

условиях отрицательных температур чревата нарушениями внутренней структуры кабеля. При отрицательных температурах, каким бы хорошим ни был гидрофобный наполнитель, его вязкость возрастает, что препятствует свободному перемещению волокон в сердечнике кабеля и является причиной

возникновения дополнительных напряжений (рис. 5.9). Даже незначительные



Рис. 5.9. Прокладка и монтаж кабеля в мороз

оптический кабель в грунт, целесообразно применять воздушные способы строительства, вплоть до восстановления опор воздушных линий связи, которые были построены еще в начале прошлого века.



Рис. 5.10. Прокладка кабеля в грунт в условиях вечной мерзлоты

подвижки слоев грунта могут оказаться фатальными для целостности волоконного кабеля и привести к обрыву волокон в нем. Особенно сильно этот процесс проявляется в районах с повышенной сейсмоактивностью (рис. 5.8), в местах разломов горных пород и в районах вечной мерзлоты (рис. 5.10). В таких условиях не рекомендуется прокладывать опти-

В городских условиях – это просаживание каналов кабельной канализации в результате различного рода протечек городских коммуникаций.

При прокладке волоконно-оптического кабеля в городской черте широко используются канализационные коммуникации, которые в свою очередь подвержены деформациям в результате, например, просадки грунта (рис. 5.11).

Кабель внутри них обычно жестко фиксируется, поэтому в результате деформаций канализационных ходов могут возникать локальные деформации оптических волокон.

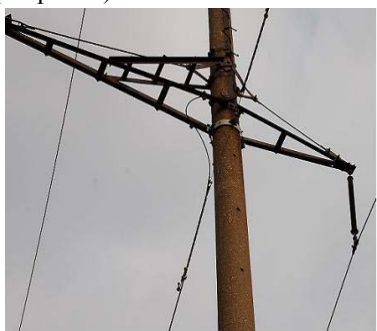
Возникшие напряжения впоследствии неминуемо приведут к обрыву оптического волокна. В данном случае оптическое волокно может выступать в роли сенсора подобных деформаций. Имея соответствующее измерительное оборудование, по характеру возникших напряжений внутри волокна можно судить о масштабе и опасности деформаций.

Слабым местом воздушных способов строительства является некорректное крепление кабеля к телу опоры. В результате воздействия ветровых нагрузок с течением времени на оболочке кабеля появляются трещины, которые вызывают дальнейшее ее разрушение. Отсутствие защитного контейнера в местах соединения строительных длин (рис. 5.12) приводит к тому, что в осенне-зимний период между витками технологического запаса кабеля накапливается влага, которая, естественно, замерзает и увеличивается в объеме. Это вызывает постоянное перемещение витков кабеля относительно друг друга, дополнительные изгибы и напряжения.

Подвеска кабеля в мощном электрическом поле чревата развитием трекинг-процесса (возникновением поверхностных токов – треков, протекающих по микротрещинам в оболочке кабеля), который вызывает достаточно быстрое разрушение (сгорание) всего кабеля.



Рис. 5.11. Просаживание грунта и повреждение кабельной канализации



а)



б)

Рис. 5.12. Крепление самонесущего ВОК к опоре:

- а – неудачное крепление самонесущего ВОК (в месте крепления троса к опоре и кабеля к тросу при ветровых нагрузках повреждение неотвратимо);
- б – отсутствие защитного контейнера для муфты и технологического запаса ВОК

Перепады температуры окружающей среды (сезонные и среднесуточные). Элементы кабельного сердечника и его оболочки имеют различные коэффициенты теплового расширения, поэтому в случае резкого перепада температуры могут возникать существенные напряжения внутри оптического волокна из-за неравномерного расширения соприкасающихся материалов.

В результате большие среднесуточные колебания температуры окружающей среды могут привести к разрушению волокна.

Как и в случае с обычным электропроводом, возникает проблема, связанная с обледенением определенных участков кабеля в зимний период (рис. 5.13).



Рис. 5.13. Обледенение ВОК

Значит, натяжение кабеля под весом льда будет причиной появления напряжений внутри волокна, которые могут оказаться необратимыми и значительно сократить срок его службы.

Ураганные нагрузки на опоры и подвесные кабели. В последнее время все более популярным становятся воздушные методы прокладки оптического кабеля с подвешиванием его на различного рода опорах – телеграфных и высоковольтных столбах линий электропередач, контактных сетей электрифицированных железных дорог и пр.

Однако все опоры рассчитаны на определенные нагрузки и при возникновении нестандартных ситуаций они могут быть повреждены (рис. 5.14).

Просаживание фундаментов зданий, мостов, эстакад и прочих инженерных сооружений. Проблемы, аналогичные описанным выше, возникнут с волокном в случае просаживания фундаментов инженерных сооружений или при деформации их отдельных частей (рис. 5.15, 5.16). Повышенное натяжение волокна в кабеле вызывает деградацию его прочностных характе-

ристик, что в итоге приводит к разрыву волокна. Даже незначительное увеличение натяжения волокна может привести к многократному уменьшению его срока службы.



Рис. 5.14. Повреждения опор ЛЭП и подвешенной на них ВОЛС



Рис. 5.15. Обрушение и просаживание фундаментов зданий

Рис. 5.16. Разрушение мостов и эстакад в результате наводнений, оползней

Вдумайтесь: время жизни волокна в нормальных условиях эксплуатации (при относительном удлинении волокна меньше 0,3%) составляет 25 лет и более, в то время как уже при относительном удлинении 0,6–0,7% разрыв волокна произойдет в течение 1 (одного)! года.

Таким образом, надежность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о натяжении волокна в кабеле. Необходимо, однако, отметить, что зачастую все вышеперечисленные явления являются относительно медленными во времени процессами. И с момента появления напряжений в волокне до момента обрыва пройдет не один месяц, а возможно и год.

За этот промежуток времени можно не только обнаружить проблему, но и устранить ее, имея соответствующее измерительное оборудование. Обычные оптические рефлектометры не в состоянии определить натяжение волокна, поскольку величина оптических потерь при возникновении напряжений в световоде, как правило, остается в пределах нормы вплоть до момента наступления необратимых изменений в нем.

Безусловно, основной мерой оценки надежности ВОЛС может служить статистическая информация о причинах, характере и количестве повреждений на линиях, работающих в различных условиях.

Эту информацию в современных трактах, основанных как на металлических кабелях, так и волоконно-оптических, собирают системы мониторинга, которые в той или иной мере отвечают потребностям СТЭЛСС, но они достаточно дороги и, если трафик на заданном участке невелик, то используют простейшие системы. Определить место повреждения ВОК или отказавший узел в аппаратуре – это только половина дела.

Другая задача и, пожалуй, главная в СТЭЛСС – устранить этот отказ (см. выражения (5.7), (5.8)) в самое короткое время.

Основные критерии оптимизации СТЭЛСС:

- объем трафика на данном участке;
- потери доходов при его сокращении в результате отказа;
- время восстановления трафика (не путать с временем восстановления ВОЛС);
- затраты на мероприятия по восстановлению трафика и их сравнение с потерями доходов;
- количество и состав инженерно-технического персонала, обслуживающего данную ВОЛС;
- оснащенность техническими средствами для ремонта и измерения;
- оснащенность запасным оборудованием (кабелем, пассивными компонентами, аппаратурой и ее частями);
- транспортные проблемы.

Оценка этих критериев может быть выполнена на основе положений (см. 4) и статистического анализа состояния ВОЛС в данном регионе.

ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТЭЛСС

Используемые в практике эксплуатации мероприятия, направленные на сокращение времени восстановления работоспособности трактов, можно разделить на две группы. К первой относятся мероприятия, направленные на развитие сети связи в целях обеспечения возможности создания обходных направлений и коммутации трактов поврежденного направления на резервные. Реализация этих мероприятий обусловлена общим планом развития сети региона. Ко второй группе можно отнести организационные и технические мероприятия, которые предполагают использование современных методов и оборудования, обеспечивающих сокращение времени обнаружения отказа, возможность временного резервирования трактов на поврежденном участке. Реализация этих мероприятий обеспечивается широким использованием систем мониторинга как на ВОЛС, так и цифровых трактах, а также применение временных ремонтных кабельных вставок на поврежденных участках, и построением системы резервирования (если это возможно) по участкам ОРП-ОРП.

6.1. Системы мониторинга ВОЛС

Системы непрерывного мониторинга оптических волокон позволяют оперативно локализовать неполадки и деградации волокна и должны предусматриваться на этапе проектирования цифровых сетей связи в структуре СТЭЛСС.

Проблема надежности ВОЛС охватывает широкий круг вопросов и по своей сути является комплексной. Ее решение требует применения соответствующих методик оценки, расчета и контроля различных параметров оптических кабелей (ОК) и показателей надежности ВОЛС [54, 55]. Надежность ВОЛС зависит от различных конструктивно-производственных и эксплуатационных факторов. К первым относят факторы, связанные с разработкой, проектированием и изготовлением ОК и других вспомогательных изделий и устройств, входящих в состав ВОЛС. Ко вторым – все факторы, влияющие на надежность ОК в процессе его прокладки, монтажа и последующей эксплуатации.

Одним из основных эксплуатационных факторов, позволяющих прогнозировать ухудшение характеристик оптических волокон и обеспечивать требуемый уровень надежности ВОЛС, является непрерывный мониторинг ОК ВОЛС [55, 56]. При этом системы мониторинга ОК ВОЛС должны предусматриваться уже на этапе планирования и проектирования современных цифровых сетей связи [38, 51, 52]. Это важно для ВОЛС на воздушных линиях электропередачи (ВОЛС-ВЛ), применяемых при создании больших корпо-

ративных сетей связи крупными энергокомпаниями. Такие ВОЛС-ВЛ имеют высокую надежность, но при этом в случае аварии требуют значительных затрат времени и материально-технических ресурсов на проведение аварийно-восстановительных работ [10, 53].

В настоящее время ОК с одномодовыми оптическими волокнами различного типа являются наиболее совершенной средой для передачи информации. По полосе пропускания (скорость передачи свыше 10 Гбит/с), линейным потерям (затухание 0,2–0,25 дБ/км) и дальности передачи (свыше 150 км) ОК не имеют себе равных. Одна из важнейших задач – поддержание характеристик волокна на надлежащем уровне. Именно поэтому системы непрерывного мониторинга оптических волокон в ОК ВОЛС приобретают особую значимость при построении современных цифровых мультисервисных сетей.

Такие системы – системы дистанционного тестирования волокон **RFTS (Remote Fiber Test System)** – в настоящее время выпускаются рядом зарубежных компаний [55]. Однако для практического применения подобных систем при построении больших протяженных сетей связи требуется серьезный сравнительный анализ возможностей различных систем RFTS и изучение проблемы их интеграции с системами информационной поддержки и управления такими сетями.

В рамках настоящего пособия рассмотрены основы построения систем RFTS, их применение в сетях связи, представлены результаты сравнительного анализа систем RFTS для больших корпоративных сетей на основе ВОЛС и практические рекомендации по выбору таких систем для различных применений.

Система дистанционного контроля ОК цифровой сети связи. Широкое распространение современных цифровых сетей на основе ВОЛС привело к пересмотру самих принципов их обслуживания и эксплуатации. Из-за больших объемов передаваемой информации в сети, высокой стоимости потери трафика вследствие повреждения ОК и большой протяженности ВОЛС требуется оперативное и квалифицированное обслуживание и своевременная диагностика линий. Решение этих задач при построении крупных волоконно-оптических сетей возможно на основе применения автоматизированной системы непрерывного мониторинга ОК сети и перехода к принципу их профилактического обслуживания.

Архитектура RFTS. Все системы RFTS, как правило, строятся по одной и той же схеме (рис. 6.1), при этом выделяют следующие функциональные элементы и устройства:

- аппаратную часть;

- систему управления;
- интегрированные элементы:
- геоинформационную систему (ГИС) привязки топологии сети к карте местности;
 - базы данных ОК, оборудования сети, критериев и результатов тестирования ОК ВОЛС и сети в целом, и другие внешние базы данных.

Аппаратная часть включает:

- блоки дистанционного тестирования волокон RTU (Remote Test Unit), в которые могут устанавливаться модули оптических рефлектометров OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), модули доступа для тестирования волокон ОТАУ (Optical Test Access Unit) – оптические коммутаторы и другие модули;

- центральный блок управления TSC (Test System Control) системой RFTS – центральный сервер;

- станции контроля сети ONT (Optical Network Terminal).

Элементами системы управления RFTS являются:

- станции контроля сети ONT (notebook или стационарные рабочие станции);

- соответствующее программное обеспечение;

- блоки управления в RTU;

- центральный блок управления TSC и сетевое оборудование, обеспечивающее связь между компонентами управления.

В стратегически важных точках сети устанавливаются блоки RTU (рис. 6.1). Конфигурация системы RFTS (выбор блоков RTU, их размещение по узлам сети и комплектация модулями OTDR, ОТАУ и др.) оптимизируется исходя из топологии сети, стоимости оборудования, требований надежности системы RFTS и других критериев. При этом тестироваться могут как пассивные волокна ВОЛС (метод тестирования пассивных оптических

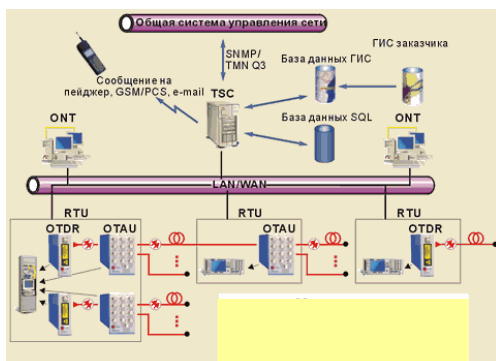


Рис. 6.1. Общий принцип построения системы мониторинга ВОЛС: TSC – центральный блок управления; RTU – блок дистанционного управления; ONT – станция контроля сети; OTDR – оптический рефлектометр; ОТАУ – оптический коммутатор

сетей), так и активные волокна (метод тестирования активных оптических сетей). Оптический рефлектометр периодически снимает данные по затуханию с подключаемых к нему оптических волокон сети. Каждая полученная рефлектограмма сравнивается с эталонной, отражающей обычно исходное состояние волокна. Если отклонение от нормы превышает определенные, заранее установленные пороги (предупреждающий или аварийный), соответствующий блок RTU автоматически посылает на центральный сервер системы предупреждение или сообщение о неисправности. Все рефлектограммы также поступают на центральный сервер, который сохраняет их в базе данных для дальнейшей обработки.

Центральный сервер системы обеспечивает доступ ко всем результатам тестирования волокон для любой станции контроля сети и автоматически рассылает сообщения о неисправностях в зависимости от уровня серьезности события на заранее заданные IP- или электронные адреса, пейджеры и телефоны, узлы обслуживания ВОЛС.

Оборудование мониторинга целостности ВОЛС. В настоящее время наиболее широкое распространение получили три варианта организации систем мониторинга целостности ВОЛС (RFTS), отличающихся друг от друга своими возможностями.

Мониторинг осуществляется с помощью:

- источника излучения на одном конце линии и приемника на другом, в этом случае при возникновении «аварии» на линии определяется участок, на котором произошел обрыв оптического кабеля или возникло дополнительное затухание, но в такой системе невозможно определить местоположение «аварии»;
- оптического рефлектометра (классическая система RFTS), в этом случае определяется и проблемный участок кабеля, и месторасположение «аварии»; но в такой системе существует значительная временная задержка между измерениями волокон (до 10 мин и более), необходимая в работе рефлектометра;
- так называемой системы ARFTS (Advanced Remote Fiber Test System), являющейся комбинацией двух предыдущих, т. е. непрерывный мониторинг всех участков оптического кабеля с помощью источника излучения на одном конце линии и приемника на другом, в случае возникновения «аварии» на линии с помощью пары «передатчик-приемник» в короткий промежуток времени определяется проблемный участок ВОК и уже после этого прово-

дится измерение затухания на этом участке с помощью рефлектометра.

Важно отметить, что в каждом из перечисленных выше вариантов возможна организация системы мониторинга как с использованием «темных» (нерабочих), так и «светлых» (активных) волокон.

Первый и второй варианты используются, как правило, на внутризональных и сельских участках сети ВОЛС, где протяженность линий невелика, и объем трафика тоже невысок. Третий вариант применяется на участках сети с большим объемом трафика, где потери доходов от его пропадания становятся соизмеримы с затратами на создание и построение системы мониторинга подобного уровня.

Целесообразно рассмотреть несколько вариантов построения систем мониторинга в совокупности с оборудованием, на котором осуществляется реализация системы.

Система мониторинга, построенная на оборудовании **MLS (Monitoring Line System)**, отвечает всем современным требованиям, обладая возможностями удаленного управления и контроля через сеть Ethernet, организации нескольких рабочих мест для удаленного доступа на рабочую станцию, системой оповещения световой и звуковой сигнализации, удаленного оповещения через рассылку почтовых сообщений и отправки SMS на сотовые телефоны ответственного персонала.

Система мониторинга целостности ВОЛС с использованием пары «источник излучения-приемник» (**Transmission Monitoring** или сокращенно **ТМ**).

В системе **ТМ** мониторинг осуществляется с помощью пары «источник излучения-приемник», когда с одной стороны ВОЛС к волокну подключается модуль передатчика, с другой – модуль приемника. Основой системы является модуль **MLS 30x**, который может включать в свой состав стабилизированный источник излучения, оптический приемник, комбинацию передатчика и приемника и т.д. Модуль также может быть оснащен встроенным 4-строчным ЖК-дисплеем для осуществления мониторинга и контроля с передней панели оборудования (рис. 6.2).

Управление данной конфигурацией построено на основе внешней шины с использованием протокола обмена RS 485. Данный протокол поддерживает одновременную работу до 32 модулей (например, MLS 30R, MLS 30T, MLS 30A), подключенных к шине. Обычно обмен в шине происходит между управляемыми модулями и «мастер-модулем». Для сохранения результатов измерений может использоваться внешний накопитель. Соединение с ПК происходит через интерфейс RS 232.

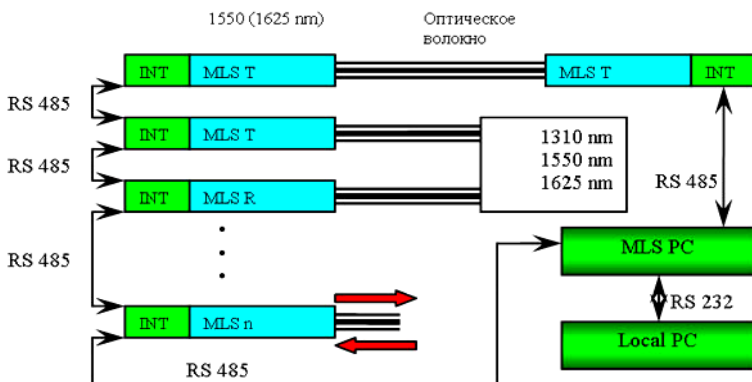


Рис. 6.2. Типичная схема построения системы мониторинга ТМ «темных» волокон для небольших ВОЛС: MLS 30T (передатчик с управлением по интерфейсу RS 485), MLS 30R (передатчик с управлением по интерфейсу RS 485), MLS 30R (MLS PC контроллер)

В случае, когда волокно не возвращается на узел, используется схема



Рис. 6.3. Модуль MLS 50

контроля с применением связи с удаленным узлом посредством протокола TCP/IP. Данная схема работает на более сложном коммуникационном уровне, в связи с чем требует применения модуля с Ethernet интерфейсом MLS 50, выступающего в качестве конвертора интерфейса из RS 485 в TCP/IP для связи с внешним MLS PC сервером, собирающим статистику работы удаленных приемников и передатчиков, анализирующим поступающую информацию и на ее основе выдающим сигнализацию о нормальном состоянии линии или об аварии. Выше рассматривалась работа системы мониторинга по «темным» волокнам, но зачастую приходится сталкиваться с ситуациями, когда нет возможности использовать «темное»

волокно для организации мониторинга ВОЛС. Обычно для таких измерений используются источники излучения, работающие на длине волны, отличной от рабочей длины волны сигнала в линии.

Оба сигнала (полезный и аналоговый измерительный сигнал) вводятся

в волокно посредством WDM-мультиплексоров и разделяются на другом конце волокна с помощью таких же устройств (рис. 6.4).

На приведенной схеме предполагается, что каналобразующее оборудование работает на длинах волн 1310 нм и/или 1550 нм, а передатчики MLS – на 1625 нм. Для автоматических измерений и локализации повреждения волокна система может быть построена на основе оптического рефлектометра или OTDR. Для того что бы иметь возможность проведения автоматических измерений на нескольких волокнах, на одном из узлов («головной» узел RFTS) совместно с OTDR обычно используется оптический переключатель (optical switch) (рис. 6.5). В этом случае количество портов переключателя соответствует количеству контролируемых волокон. Результаты проведенных измерений сохраняются на MLS PC-сервере по протоколу TCP/IP. Контроль и управление оптическим переключателем осуществляется по шине управления протокола RS 485.

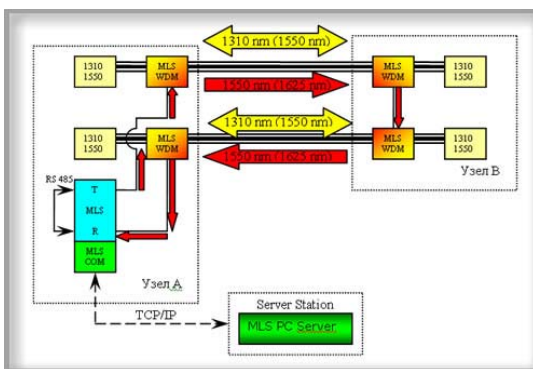


Рис. 6.4. Организация мониторинга «активных» волокон

измерений на нескольких волокнах, на одном из узлов («головной» узел RFTS) совместно с OTDR обычно используется оптический переключатель (optical switch) (рис. 6.5). В этом случае количество портов переключателя соответствует количеству контролируемых волокон. Результаты проведенных измерений сохраняются на MLS PC-сервере по протоколу TCP/IP. Контроль и управление оптическим переключателем осуществляется по шине управления протокола RS 485.

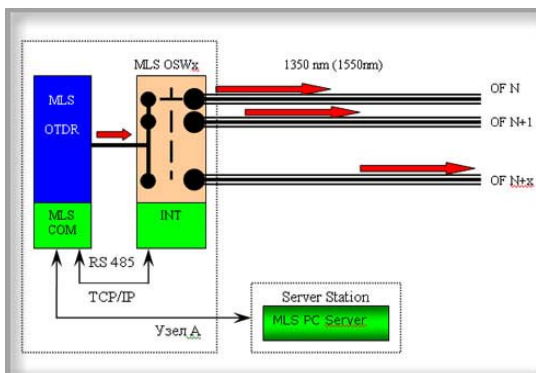


Рис. 6.5. Система с optical switch для мониторинга большого числа ОВ

Система мониторинга целостности ВОЛС с одновременным использованием «источник излучения-приемник» и оптического рефлектометра (Advanced Remote Fiber Test System или сокращенно ARFTS). Отличительной особенностью такой комбинированной системы является существенное сокращение времени определения неисправности за счет того, что степень деградации волокна регистрируется постоянно не с помощью рефлектометра, а

посредством пары «источник излучения-приемник», что позволяет в короткий промежуток времени определять работоспособность каждого из участков ВОЛС. В случае обрыва или увеличения значения затухания на одном из участков оптического кабеля к этому участку линии с помощью оптического переключателя подключается рефлектометр, который, проводя точные (но существенно более длительные) измерения, показывает дистанцию до возникшей неисправности (рис. 6.7). На основе полученных данных система ARFTS, автоматически сопоставляя их с топографическим маршрутом линии, укажет точное местонахождение аварии на карте местности. Как и в случае двух предыдущих вариантов, систему ARFTS можно организовать на сети «активных» волокон, используя WDM-мультиплексоры.

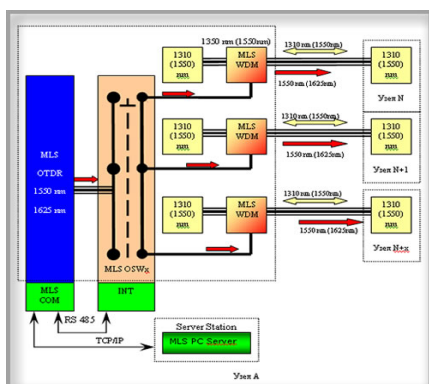


Рис. 6.6. Схема построения мониторинга целостности ВОЛС

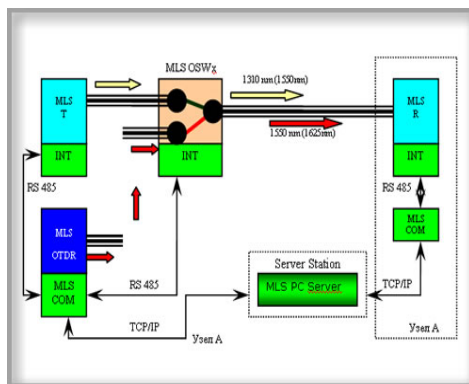


Рис. 6.7. Схема построения мониторинга ARFTS

Безусловно, хочется сравнить характеристики тех или иных систем мониторинга. Прежде всего, по техническим характеристикам, затем по методам внедрения и установки, и, наконец, по стоимости. Почему такой порядок авторы выбрали для своего анализа, определяется достаточно просто – в технике нельзя использовать старые вещи, так как они стареют и дешевеют гораздо быстрее, чем мы с Вами.

Сравнение существующих систем RFTS. Автоматизированные системы непрерывного мониторинга ОК сетей связи выпускаются рядом зарубежных компаний.

В настоящее время на российском рынке представлены четыре системы RFTS, выпускаемые ведущими мировыми производителями подобного

оборудования:

- AccessFiber (компания Agilent Technologies, бывшая Hewlett-Packard, HP);
- Atlas (компания Wavetek Wandel&Goltermann);
- FiberVisor (компания EXFO);
- Orion (компания GN Nettest).

Известны также системы RFTS SmartLGX (Lucent Technologies), OCN-MS (Nicotra Sistemi) и некоторые другие, но они слабо представлены на отечественном рынке.

Сравнительный анализ систем автоматизированного мониторинга волокон в ОК ВОЛС основан на результатах, опубликованных в технической периодике и на web-сайтах основных производителей систем RFTS [55, 56]. На диаграмме рис. 6.8 представлены функциональные и технические характеристики систем RFTS для мониторинга ОК ВОЛС.

Для удобства сравнения систем RFTS по функциональным, техническим и другим характеристикам результаты сравнительного обобщающего анализа рассматриваемых систем представлены в табл. 5.7.

Сравнительный анализ различных систем RFTS показывает, что для практического применения лучшими в функциональном и техническом планах являются системы FiberVisor (EXFO), Orion (GN Nettest) и Atlas (Wavetek Wandel&Goltermann). С учетом требований расширяемости, масштабируемости и возможности интеграции с различными ГИС предпочтение следует отдать системе FiberVisor (EXFO).

Окончательный выбор той или иной системы должен производиться с учетом стоимости конкретной системы мониторинга ОК для всей планируемой сети и с учетом ее дальнейшего развития.

Построение и развитие крупных корпоративных сетей показывает, что систему мониторинга ОК ВОЛС желательно планировать на этапе общего проектирования самой цифровой сети. При развитии большой и протяженной сети до некоторого уровня, когда необходимость установки систем RFTS становится очевидной как по техническим, так и экономическим соображениям, важно сделать правильный выбор системы мониторинга ОК ВОЛС.

Системы мониторинга ВОЛС и их некоторые параметры

	AccessFiber (компания Agilent Technologies «Hewlett- Packard», HP)	Atlas (компания Wavetek) (Wandel & Goltermann)	FiberVisor компания EXFO	Orion (компания GN Nettest).
Функции				
Мониторинг активных (занятых) волокон	+	+	+	+
Тестирование в ручном режиме по запросу	+	+	+	+
Тестирование по заданному расписанию	+	+	+	+
Функция документирова ния сети	+	+	+	+
Интеграция с электронной картой ГИС	Mapinfo	Mapinfo	InterGraph (импорт др. форматов, в т.ч. Mapinfo)	Mapinfo
Архитектура клиент-сервер, опер. система	На платформе Windows NT	На платформе Windows NT. UNIX	На платформе Windows NT	На платформе UNIX
Организация многоуровневого доступа к системе	+	+	+	+

Поддержка удаленного доступа к серверу TSC со станции ONT	-	-	+	+
Поддержка ф-ции стат. анализа х-к ОВ	+	+ с построенным графиком)	+	+
Локальное конфигурирование и управление блоком RTU	-	-	+	+ (необходим Notebook или ПК)
Автономная работа модуля RTU при потере связи с сервером	+	+	+	+
Готовые решения для мониторинга DWDM сигналов и PMD*	-	-	+ (модули OSA и PMD)	-
Поддержка протокола SNMP**	-	-	+	н/д

* PMD – Polarization Mode Dispersion, поляризационная модовая дисперсия

** SNMP – Simple Network Management Protocol

Основные технические характеристики				
Возможность установки модуля RTU в стойку	Монтаж возможен только в стойку 19"	Монтаж возможен только в стойку 19"	Установка в стойку, поставл. производ.	Монтаж возможен в стойку 19" и 23"
Оптический коммутатор (модуль OTAU)	Встроенный в RTU	Встроенный в RTU	Устанавливаемый в RTU или внешний	внешний
MAX число портов для ОВ на оптический коммутатор	96	48	96 (+ 31)	96
Протоколы взаимодействия	Q3 TMN	SNMP	Q3 TMN, SNMP	Q3 TMN

Напряжение питания, В стационарное	36-60	28-72	48-60	38-72
Наличие индикации состояния модуля RTU	—	Светодиодные индикаторы, ЖК-дисплей	Светодиодные индикаторы на модулях, дисплей	СВД индикаторы, дисплей, локальный модуль доступа
Сравнительный обобщающий анализ				
Функциональность	Близка к полной	Близка к полной	Полная	Близка к полной
Расширяемость и масштабируемость	Близка к полной	Не вполне полная	Полная	Близка к полной
Технические характеристики	Высокие	Высокие	Самые высокие	Самые высокие
Совместимость с различными ГИС	Нет	Нет	Есть	Нет
Стоимость	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Наличие сертификата в России	Нет	Есть	Нет	Есть
Общая оценка	Хорошо	Близка к отличной	Близка к отличной	Близка к отличной

Рис. 6.8. Сравнительная характеристика систем мониторинга ВОЛС

Результаты сравнительного анализа систем RFTS показывают, что на российском рынке имеется достойный выбор многофункциональных, надежных и гибких систем дистанционного и непрерывного мониторинга ОК ВОЛС для современных сетей связи. Однако, на практике, особенно на внутризональных ВОЛС, все сводится к простейшей организации мониторинга (рис. 6.9), поскольку широкополосного доступа нет и, соответственно, нет возможности обмена большими объемами информации и стоит дорого. Это относится, прежде всего, не к таким мощным структурам сети, как магистральные междугородные, международные линии, а к обычным, внутризональным линиям, где затраты на мониторинг в полном объеме приведут к тому,



Рис. 6.9. Простейшая система мониторинга ВОЛС на базе одного рефлектометра

что стоимость трафика в регионе возрастет в несколько раз. Следует отметить, что протяженность таких линий (в том числе ВОЛС) в несколько раз превышает протяженность мощных ВОЛС, но не по объему трафика. Вот в этой ситуации и начинают возникать проблемы – как оптимизировать систему эксплуатации и обеспечить необходимые показатели надежности.

Анализ этих проблем и их решение зависят, безусловно, от многих факторов. Прежде всего, это затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ, которые непосредственно связаны с простоем ВОЛС и потерями трафика.

6.2. Технические мероприятия, направленные на повышение эффективности СТЭЛСС

И вот здесь начинается самое интересное. Если первые два параметра в структуре времени восстановления могут быть определены очень быстро в результате постоянного мониторинга ВОЛС, то вторые два зависят от того, сколько ремонтных бригад находится в распоряжении (см. 4.3), какими приборами и инструментом они оборудованы, на чем поедут к месту повреждения и доедут ли туда вообще, а это все – затраты на эксплуатацию, которые должны быть соизмеримы с приносимыми доходами сети.

Очевидно, что K_T ЛС может быть повышен за счет сокращения, прежде

всего, времени перерывов связи на участках сети, а также времени восстановления T_B за счет временного резервирования трактов систем передачи. Одним из наиболее широко применяемых способов, позволяющим существенно сократить время восстановления связи на поврежденном участке – использование временных волоконно-оптических кабельных вставок (ВОКВ) [57–59]. Предполагается, что время развертывания временной вставки должно быть в 2–3 раза меньше, времени восстановления магистрального кабеля по постоянной схеме (см. 5.1).

Техническая реализация временного резервирования, может быть организована различными способами.

Для линий связи на металлических кабелях [57–59]:

- развертывание временных кабельных вставок на длине усилительных или регенерационных участков;
- проектирование комбинированных линий связи с включением в состав реконструируемой линии на металлическом кабеле, постоянной волоконно-оптической кабельной вставки;
- резервирование линейных трактов, организованных по металлическим кабелям связи, проходящим, как бы параллельно, волоконно-оптическим линиям.

Для линий связи на волоконно-оптических кабелях [19, 24, 52, 60–62]:

- **короткая ВОКВ.** Протяженность элемента вставки не более 250–300 м, что позволяет выполнить развертывание вставки без использования каких-либо механизмов, т. е. вручную, что особенно важно в условиях слож-пересеченной местности;
- **многоэлементная ВОКВ.** Наиболее широко разрекламированная представляет собой комплект из нескольких последовательно соединяемых элементов;
- **одноэлементная ВОКВ.** Представляет из себя один, максимум два элемента, обеспечивающих перекрытие всей строительной длины магистрального ВОК.

Основные требования, которые должны быть предъявлены к системе восстановления на основе временных вставок, можно сформулировать следующим образом:

- многократное использование вставки – большое число циклов развертывания;
- возможность быстрого подключения к магистральному кабелю;

- возможность развертывания вставки в сложных условиях пересеченной местности при наличии различного рода переходов через автомобильные и железные дороги, реки, овраги и пр.;
- обеспечение работоспособности вставки в течение необходимого и достаточного времени на проведение требуемых ремонтно-восстановительных работ;
- сохранение всех требуемых нормами характеристик тракта, на котором используется вставка.

6.3. Волоконно-оптические кабельные вставки

для линейных трактов, организованных по металлическим кабелям

Временные волоконно-оптические кабельные вставки (ВОКВ), предназначенные для развертывания на усилительном или регенерационном участке представляют совокупность линейной части и активного оборудования, в качестве которого выступают так называемые электрооптические модемы (ЭОМ). Они выполняют функцию преобразования линейного сигнала АСП, ЦСП в оптический диапазон, и обратно. Эти ВОКВ могут применяться для проведения планово-профилактических и аварийно-восстановительных работ на линейных трактах как аналоговых систем передачи (которых еще очень много на сети), так и цифровых.

Эффективность их применения состоит в том, что на время проведения различных работ на кабеле или необслуживаемых пунктах, связь осуществляется по этим вставкам и потери трафика минимальны. Как правило, протяженность такой вставки не более одного – двух регенерационных (усилительных) участков. Применение оптического кабеля для этих целей в 10–20 и более раз сокращает объем, вес, упрощает конструкцию, а также технологию развертывания вставки.

Например, при использовании ВОКВ на линейных трактах систем передачи типа LA 140×2, работающей по коаксиальным парам 2,6×9,4 мм, где время ремонта кабеля составляет около 8,5 ч, а время развертывания вставки около 2 ч (в зависимости от профиля местности), потери трафика сокращаются более чем на 400%.

Безусловно, применение ВОКВ оправдано там, где потери трафика существенно «бьют по карманам» эксплуатирующих организаций. Это определяет эффективность их использования, так как стоимость ВОКВ в составе линейной и аппаратной частей оказывается достаточно высокой для малокабельных линий с небольшим объемом трафика. Как показывают экономиче-

ские оценки, ВОКВ целесообразно использовать на следующих трактах, организованных по металлическим кабелям: АСП (К-3600, К-1920); ЦСП (LA 140×2, ИКМ-1920, РСМ-480, LC-34).

Но, если очень хочется и много денег, то можно их использовать на всех существующих в первичной сети трактах и системах передачи.

Применение ВОКВ. Для линейных трактов, организованных по металлическим линиям связи, применение ВОКВ не должно нарушать работу последних и качество каналов. Установка ВОКВ не должна приводить к возрастанию уровня шумов в аналоговых трактах и росту значения ВВЕР в цифровых, т. е. линейный тракт не должен «чувствовать», что в его структуре появилось «инородное тело».

Это может быть обеспечено только правильным построением активного оборудования для ВОКВ.

6.4. Принципы построения ЭОМ для аналоговых и цифровых систем передачи

Первый – традиционный подход, заключающийся в оцифровке линейного сигнала АСП последующего кодирования для модуляции источника излучения, передаче по оптическому кабелю и затем обратное преобразование. В этом случае возникает достаточно много проблем, прежде всего, с оцифровкой линейного сигнала, так как в АСП предусматривается введение предискажений. При плоской диаграмме уровней защищенность различных каналов многоканальной АСП от термического шума неодинакова. С повышением частоты в линейном спектре защищенность канала понижается. Если обеспечить требуемую защищенность от термического шума для верхнего по линейному спектру канала, создается неизбежный запас для нижних по спектру каналов. Поэтому для выравнивания защищенности каналов вводят перекося уровней.

При вводе предискажений необходимо учитывать, что они вносят изменения в спектральную характеристику продуктов нелинейности, поэтому выравнивание защищенности каналов от суммарных помех, обусловленных термическим шумом и нелинейностью, возможно лишь при некоторой оптимальной величине перекося уровней.

Как правило, вводят предискажения с линейной зависимостью уровня передачи от номера канала [9].

При линейном перекося уровней

$$p(f) = p(f_1) + k(f - f_1), \quad (6.1)$$

где $p(f_1)$ – измерительный уровень при нижней граничной частоте линейного спектра; k – коэффициент пропорциональности, равный $\Delta p/(f_2 - f_1)$; Δp – перекос уровней в линейном спектре.

В этом случае спектральная характеристика многоканального сигнала определяется выражением

$$P(f) = P(f_1) \cdot e^{2k(f-f_1)}. \quad (6.2)$$

Общая мощность сигнала

$$P_c = P(f_1) \cdot (e^{2k(f_2-f_1)} - 1)/2k. \quad (6.3)$$

Таким образом, введение предскажений существенно усложняет оцифровку линейного сигнала АСП, тем более, что, например для АСП К-3600 линейный спектр занимает полосу частот 0,812–18,6 МГц. При введении контура наклона, восстанавливающего плоскую диаграмму уровней, изменяется соотношение мощностей теплового шума и шумов от нелинейности, в результате чего суммарная психофотометрическая мощность шумов в каналах, приведенная к точке с нулевым относительным уровнем, расположенных в разных частотных промежутках линейного спектра, будет неодинакова.

Вторым фактором, ограничивающим возможность реализации подобного принципа построения ЭОМ, является широкополосность сигнала линейного спектра, высокие требования к точности преобразования в цифру, а также постоянно изменяющийся уровень загрузки системы. Этот фактор требует высокой разрядности кода преобразования.

Наиболее целесообразным и значительно более просто реализуемым является принцип непосредственной модуляции сигналом линейного спектра АСП источника излучения по интенсивности. В этом случае основными факторами, которые будут определять качество каналов, транслируемых по составному тракту, – это добавки суммарных шумов за счет шумов преобразования в источнике излучения и шумов фотоприемника.

Рассмотрим основные шумовые характеристики полупроводниковых источников излучения и их вклад в общее значение шумов тракта.

6.5. Источники шумов в полупроводниковых лазерах [20–23]

Флуктуации мощности излучения лазерного диода, характеризующиеся относительной интенсивностью шума **RIN** (Relative Intensity Noise). Этот параметр учитывает дополнительные аддитивные шумы (по отношению к дробовым шумам фототока), появляющиеся на выходе фотодетектора.

Спектральная плотность шума тока фотодиода при освещении его из-

лучением лазера

$$i_{\text{пол}}^2 = i_{\text{лаз}}^2 + i_{\text{др}}^2, \quad (6.4)$$

где $i_{\text{лаз}}^2$ – спектральная плотность шумового тока, обусловленного флуктуациями интенсивности излучения, $i_{\text{др}}^2 = 2eI_{\text{ф}}$ – спектральная плотность дробового шума при среднем фототоке $I_{\text{ф}}$,

$$I_{\text{ф}} = SP_{\text{лаз}}, \quad (6.5)$$

S – токовая чувствительность фотодетектора, $P_{\text{лаз}}$ – средняя мощность лазерного излучения.

Относительная интенсивность шума, дБ/Гц

$$\text{RIN} = (\Delta P)^2 / (P_0)^2, \quad (6.6)$$

где ΔP – среднеквадратическая флуктуация интенсивности; P_0 – усредненная оптическая выходная мощность.

Таким образом, RIN показывает возможное отношение сигнал/шум на приемнике. У одночастотных лазеров RIN меньше, чем у многомодовых лазеров. Для различных лазеров RIN лежит в пределах $-130 \dots -150$ дБ/Гц. В многомодовых лазерах с увеличением тока накачки RIN основной моды уменьшается, а RIN прочих мод увеличивается.

Этот источник шумов следует учитывать при модуляции интенсивности широкополосным аналоговым сигналом при большом требуемом отношении сигнал/шум.

Шум распределения мод (SNR). Спектр излучения одномодового лазера является функцией тока возбуждения (рис. 6.10).

Когда излучение лазера промодулировано по интенсивности, его спектральный состав изменяется. Из-за хроматической дисперсии оптического волокна варьируется форма волны на выходе волоконного световода, называемая шумом распределения мод.

Среднеквадратическая доля мощности, которая флуктуирует между модами, количественно описывается с помощью k -фактора Огава. Обычно значения k изменяются в интервале от 0,2–0,5.

С приемником без шума максимальное отношение сигнал/шум

$$\text{SNR}_{\text{max}} = 20 \log [2/kx^2 (\Delta\lambda \text{DBL})], \quad (6.7)$$

где k – фактор Огава, x^2 – компенсационный множитель, примерно равный 2, $\Delta\lambda$ – полная ширина спектра излучения по половине интенсивности, D – дис-

персия волокна, B – требуемая широкополосность системы, L – длина линии.

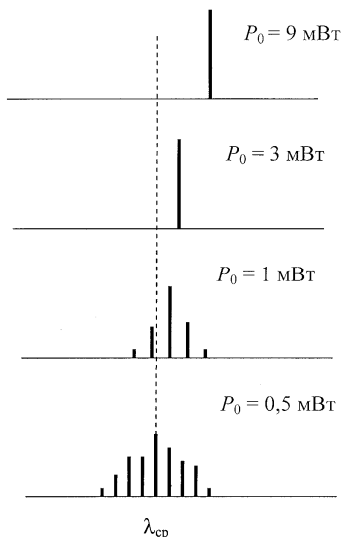


Рис. 6.10. Изменения в спектре излучения одномодового лазера при модуляции по интенсивности

Проведем оценку уровня мощности шума для одномодового лазера с $k=0,45$ и среднеквадратической шириной спектра $\Delta\lambda=2$ нм, который предполагается использовать в составе волоконно-оптической кабельной вставки в линейном тракте К-3600. При этом допустимое соотношение сигнал/шум собственно в тракте в точке с измерительным уровнем -35 дБ должно быть не хуже 95 дБ, а широкополосность системы составляет $18,6$ МГц. Длину вставки в рассматриваемом примере выберем равной $3,0$ км. Хроматическая дисперсия оптического волокна составляет $3,0$, пс/нм×км, тогда

$$\Delta\lambda DBL = 2 \times 3 \times 18,6 \times 30 = 3330,$$

$$SNR_{\max} = 20 \log \left| 2 / (0,45 \times 2 \times 10^6) \right| \cong -126 \text{ дБ}.$$

Таким образом, если учитывать рассмотренные два вида шумов источника излучения, можно ожидать, что в реальных условиях эти факторы будут вносить незначительную добавку в общее значение шума составного тракта.

Другим дополнительным источником шума являются флуктуации интенсивности лазера, вызванные оптическими отражениями обратно в резонатор лазера от неоднородностей пути распространения излучения. Если рассмотренные ранее шумы источника излучения приводят к росту тепловых шумов составного тракта, это явление приводит, прежде всего, к росту нелинейных

шумов. Отраженное излучение, попадая в резонатор лазера, нарушает линейность характеристик лазера, спектральную стабильность и ухудшает шумовые свойства. Искажения могут возникнуть за счет небольшого изменения расстояния между лазером и торцом оптического волокна, что вызывает скачкообразную смену лазерных мод, и из-за дисперсии материала волокна появляются временные скачки сигнала. На выходе оптического волокна скачкообразная смена мод проявляется в виде фазовой модуляции ИКМ-сигналов. При установке изолятора остается влияние отражений на границе раздела между лазером и элементом развязки. Лазеры, спектр которых состоит из многих продольных мод, мало чувствительны к обратным отражениям. Но при этом ограничивается полоса пропускания из-за дисперсионных искажений.

Влияние обратного света на характеристики лазера заметно уже при попадании в лазер 0,003% излученного света, а при попадании 5% – обратное оптическое излучение приводит к генерации импульсного типа.

Вследствие попадания отраженного сигнала в лазер могут происходить следующие изменения:

- формы ватт-амперной характеристики, величины порогового тока,
- спектра колебаний (сдвиг резонансной длины, изменение числа генерируемых продольных мод).

Для устранения влияния обратного света на излучение лазера используется оптический изолятор, принцип действия которого основан на невзаимном повороте плоскости поляризации в результате эффекта Фарадея. Основным элементом изолятора – стержень из ферромагнитного материала, например, железо-иттриевого граната (ЖИГ). Стержень намагничен продольным полем H_0 , которое вызывает поворот плоскости поляризации оптической волны на 45° . Поворот всегда происходит против часовой стрелки навстречу вектору H_0 . В результате двукратного прохождения оптической волны через стержень плоскость поляризации ее оказывается повернутой на 90° . На входе лазера можно поставить поляризатор. Изолятор обеспечивает развязку 30...40 дБ, потери – около 1 дБ.

Кроме указанных выше причин, вызывающих возрастание шумов в составном тракте, существенное влияние оказывает температурная нестабильность ватт-амперной характеристики источника излучения. Нестабильность температурного режима работы источника вызывает изменения в линейности характеристики, что в свою очередь приводит к возникновению дополнительных нелинейных искажений в составном тракте. Температурная зависи-

мость излучения основной моды для инжекционного лазера представлена на рис. 6.11. Стабилизация температурного режима осуществляется с использованием холодильника на ячейке Пельтье, что становится особенно важно при установке модемов в цистернах НУП (НРП).

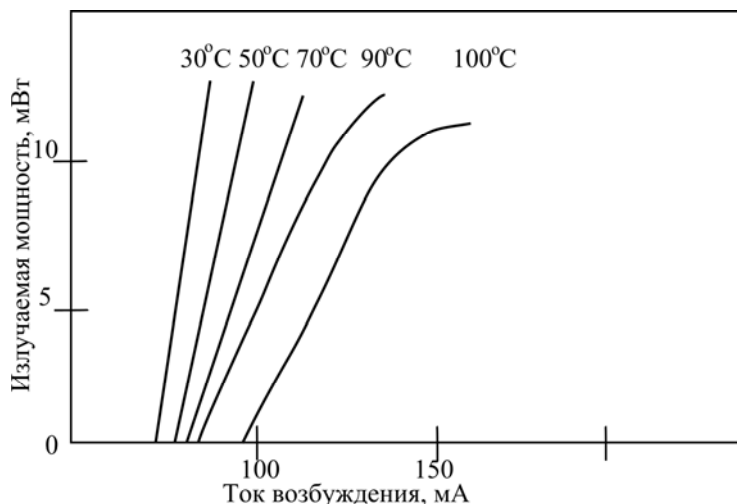


Рис. 6.11. Температурная зависимость выходной оптической мощности от тока смещения

Для получения низких значений уровня шумов в составном аналоговом тракте в последнее время начинают применяться одномодовые одночастотные лазеры следующих групп – лазерный диод (C^3), лазерный диод с внешним изолятором (ЕС), лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB).

В каждой структуре имеется селективный по длине волны механизм подавления нежелательных спектральных мод. Одночастотный режим поддерживается в интервале температур от $20^{\circ}C$ до $\approx 100^{\circ}C$ с характерной зависимостью $0,1 \text{ нм}/^{\circ}C$.

Максимальное подавление боковых мод (S) обеспечивается в лазерных диодах с распределенной обратной связью и достигает значения 1000. Однако стоимость подобного типа источников излучения высокая, и их использование в структуре активного оборудования может оказаться нецелесообразным.

6.6. Ввод излучения в оптические волокна

Эффективность ввода оптического излучения будет оказывать существенное влияние как на допустимую протяженность волоконно-оптической вставки, так и на рост нелинейных шумов, возникающих за счет обратного отражения от стыка кристалл лазера-соединительная вилка, а также соединительная вилка-оптическое волокно [22].

Существует несколько методов соединения полупроводниковых излучателей с оптическими волокнами:

- непосредственное, торец волоконного световода устанавливается и фиксируется непосредственно вблизи поверхности излучения лазера;
- с использованием различных согласующих устройств (микролинз сферических и цилиндрических, фоконов, граданов).

Эффективность ввода излучения в световод, определяемая отношением мощности излучения, вводимого в волоконный световод, к мощности излучения источника, существенно зависит от характеристик самого световода – числовой апертуры, площади сердцевинки и профиля показателя преломления. Для источника, когда угловое распределение яркости может быть описано зависимостью $B(\theta)=B(\cos\theta)n$, эффективность ввода в многомодовый двухслойный волоконный световод $\eta_{\text{вв}} = [(n+1)/2](NA)^2$. При этом предполагалось, что площадь излучения источника меньше или равна площади сердцевинки волокна.

Эффективность ввода излучения лазера в волокно может быть увеличена за счет применения оптических согласующих устройств, таких как сферические линзы, фоконы, цилиндрические линзы при условии, что произведение площади излучения на величину телесного угла меньше произведения площади сердцевинки волокна на величину телесного угла приема (критического угла). Оптический согласующий элемент служит для увеличения площади излучения и уменьшения в той же самой пропорции расходимости излучения.

Следует отметить, что жесткие требования предъявляются к точности механических совмещений источников излучения и волоконных световодов (радиальное и продольное смещение, угловое рассогласование).

Рассмотрим ввод излучения из одномодового лазера в одномодовое оптическое волокно через согласующую вставку из анизотропного оптического волокна (АОВ), в котором градиент показателя преломления в середине волокна создается не за счет изменения химического состава стекла, а в результате упорядочения внешним электрическим полем в процессе производ-

ства внутренней молекулярной структуры. При этом анизотропные молекулы и образующиеся микрокристаллы материала сердцевины ориентированы (эффект Керра–Поккельса) так, что их оптические оси направлены вдоль силового электрического поля.

АОВ с плоским торцом на входе можно рассматривать как протяженную сферическую линзу, для которой фокусное расстояние

$$f_1 = Rne/2(ne - 1), \quad (6.8)$$

где $ne = \sqrt{\epsilon\epsilon}$ – показатель преломления для необыкновенной волны на оси АОВ; R – радиус кривизны силовой линии внешнего электрического поля.

Чтобы скомпенсировать сферическую aberrацию частичной дефокусировкой, необходимо приемный плоский торец АОВ разместить на расстоянии $l_1 < f_1$ от источника.

Другой конец АОВ стыкуется с одномодовым оптическим волокном непосредственно, например, сваркой. Следовательно, потери прежде всего будут определяться френелевским отражением от торца АОВ, которые появятся из-за различия показателей преломления источника излучения ne ($ne = 3,6$ для арсенида галлия) и сердцевины торца АОВ $n1 \approx ne \approx 1,5$.

Формула Френеля для случая нормального падения волны на плоскую границу раздела между двумя средами с $nc1$ и $nc2$ определяет потери на отражение

$$A_0 = 10\lg(nc1 + nc2)^2/(4nc1 \times nc1). \quad (6.9)$$

Если между ними имеется воздушный зазор с $nз = 1$, то $A_0 = A_{из} + A_{з1} \approx \approx 1,67$ дБ + $0,18$ дБ = $1,85$ дБ. Если зазор заполнить иммерсионной жидкостью (клеем) с $nж = 1,5$, то $A_0 = 0,8$ дБ.

Возможен вариант исполнения согласующей вставки из АОВ с оплавленным входным торцом.

Эффективная технология изготовления такой микролинзы предусматривает следующую последовательность операций. После удаления защитного покрытия АОВ протравливается в плавиковой кислоте. Затем протравленный участок помещается в фокус лазера на CO_2 , импульсная мощность которого составляет порядка 25 Вт, а длина волны излучения – $10,2$ – $10,6$ мкм. Излучение с такой длиной волны поглощается торцом АОВ, образуя под действием поверхностного натяжения сферическую поверхность аморфной микролинзы.

6.7. Шумы оптических фотоприемников и их влияние на качество каналов составного тракта

Оптические приемники состоят из фотодетектора, подключенного к предварительному усилителю. Эффективность преобразования – это отношение электронов, образующих фототок к числу падающих на детектор фотонов (квантовая эффективность η) и достигающая, как правило, 80–90%.

При этом можно выделить несколько причин, вызывающих возрастание шумов в составном тракте [20].

Эквивалентная мощность шума (NEP). Шум на входе предварительного усилителя вызывают следующие факторы: тепловой шум (I_{Th}); дробовый шум темнового тока (I_{Dsh}); квантовый дробовый шум (I_{Qsh}); лавинный избыточный шум (I_{ex}); шум распределения мод ИЛД (I_{Lpn}); шум распределения мод волоконного световода (I_{Fpn}); относительная интенсивность шума ИЛД (I_{RIN}).

Полный шумовой ток равен сумме среднеквадратических значений токов всех его составляющих.

Тепловой шум. Объясняется движением случайных электронов в цепи из параллельно включенных сопротивления rd фотодиода с обратным смещением и резистора Rb в цепи смещения:

$$(I_{th})^2 = 4kTB/R, \quad (6.10)$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – температура, °К; B – рабочий интервал частот, МГц; $R = rd/Rb$.

Для p-i-n фотодиода на основе InGaAs, который имеет темновой ток порядка 5 нА, принимаемая оптическая мощность составляет –27 дБм. Если в схему включен резистор цепи смещения 4 кОм, тепловой шум в полосе 1 Гц получится равным $2,04 \text{ пАГц}^{-0,5}$.

Дробовый шум темнового тока. Дробовый шум темнового тока вызван случайным потоком носителей заряда темнового тока через смещенный переход:

$$(I_{sh})^2 = 2eI_{du}, \quad (6.11)$$

где e – заряд электрона; I_{du} – темновой ток.

Темновой ток всех полупроводниковых диодов зависит от частоты и в интервале температур от 20 до 50°C изменяется от 2-х до 10 раз.

Среднее значение тока для фотодиода на основе InGaAs

$$(I_{sh}) = 4,0 \times 10^{-14} \text{ АГц}^{-0,5}.$$

Квантовый дробовый шум. Квантовый дробовый шум возникает в ре-

зультате случайного попадания фотонов на поверхность детектора. Испускание фотонов является статистическим процессом, и всегда существует определенная вероятность того, что не все фотоны попадут на приемник. Поскольку энергия оптических фотонов значительно выше энергии теплового шума, практически соотношение сигнал/шум ограничивается значением квантового дробового шума.

Типичное расчетное значение квантового шума для рассматриваемого выше фотодиода при зарегистрированной принимаемой мощности 2 мкВт составляет $(I_{qsh}) = 0,74 \times 10^{-13} \text{ АГц}^{-0,5}$.

Лавинный избыточный шум. Избыточный шум в лавинных фотодиодах обусловлен различием в ионизации электронов и дырок и определяется из следующего соотношения:

$$(I_{ex}) = 2eI_{dm}G^2F(G), \quad (6.12)$$

где I_{dm} – ток, G – лавинное усиление, $F(G) = kG + (1-k) \times (2-1/G)$ – коэффициент лавинного избыточного шума, k – отношение постоянной ионизации дырок к постоянной ионизации электронов.

Лавинный избыточный шум приводит к значительной деградации отношения сигнал/шум при высоких значениях лавинного усиления. В фотоприемниках на основе кремния электроны преобладают в лавинном процессе, значение k изменяется в диапазоне от 0,02 до 0,1, избыточный шум минимален.

Для фотоприемников на основе германия составляющие шума от дырок и электронов сопоставимы и значение k варьируется от 0,7 до 1,0, что приводит к существенному возрастанию избыточного шума.

Расчет избыточного шума для выбранного фотодиода при $k = 0,4$ и лавинным усилением 25 показывает, что его величина

$$(I_{ex}) = 3,35 \times 10^{-12} \text{ АГц}^{-0,5}.$$

Шум распределения мод. Обусловлен перескоком спектральных мод в ИЛД, что особенно важно при работе с одномодовым оптическим волокном.

Шум распределения мод волоконного световода. Обусловлен изменением в распределении света среди распространяющихся по волоконному световоду мод. При использовании различных типов источников соотношение сигнал/шум на выходе фотоприемника уменьшается на 1–5 дБ.

Относительная интенсивность шума. Представляет серьезную проблему при непосредственной модуляции источника излучения в широкой полосе частот:

$$(I_{RIN})^2 = RIN \times I_{rek}, \quad (6.13)$$

где I_{rek} – усредненный зарегистрированный фототок.

Усилители фототока. Для усиления слабого фототока требуется предварительный усилитель с низким уровнем шума. Такой усилитель характеризуется чувствительностью и динамическим диапазоном. Чувствительность определяется оптической мощностью, которая попадает на детектор и формирует на выходе приемника необходимое соотношение сигнал/шум. Динамический диапазон определяет увеличение мощности, которое вызывает увеличение искажений в аналоговом приемнике [21].

В настоящее время применяются приемники с трансимпедансным усилителем и с высоким импедансом (рис. 6.12), обеспечивающие наиболее низкий уровень шума и максимальную чувствительность. Однако вследствие высокого нагрузочного импеданса на входном каскаде, частотная характеристика ограничивается постоянной времени RC входной цепи:

$$F_c = 1/(2\pi \cdot RC), \quad (6.14)$$

где R – сопротивление из параллельно включенных сопротивлений цепи смещения и входного усилителя; C – емкость из параллельно включенных емкостей фотодиода и входной усилителя.

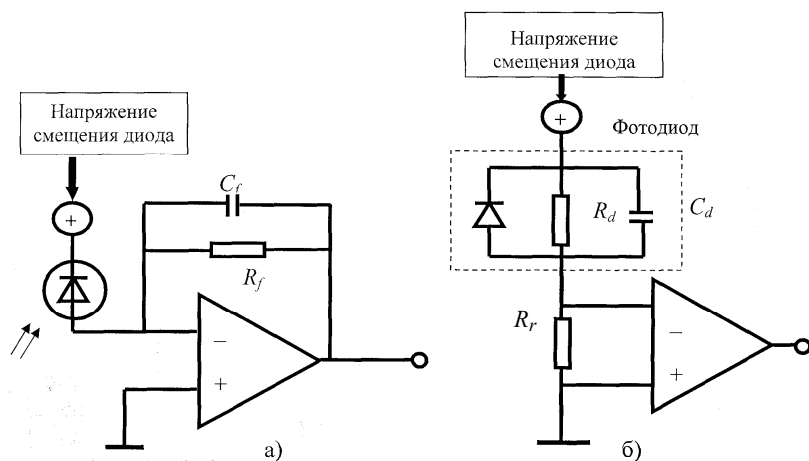


Рис. 6.12. Основные схемы приемников оптического излучения:
 а – с трансимпедансным усилителем,
 б – с высоким импедансом

Значения емкостей различных фотодиодов лежат в пределах 0,5–1,0 пФ. Из-за значительной постоянной времени такой приемник интегрирует регистрируемый сигнал.

Трансимпедансный усилитель применяется для устранения ограниче-

ния динамического диапазона усилителя с высокоомным входом, обеспечивающим динамический диапазон вплоть до 40 дБ. Кроме того, используемая отрицательная обратная связь обеспечивает расширение полосы пропускания и напряжение на выходе:

$$U_{\text{вых}} = -I_d R_f, \quad (6.15)$$

где R_f – сопротивление обратной связи; I_d – ток фотодиода.

Таким образом, дополнительный шум в приемнике является результатом теплового шума нагрузки детектора или сопротивления цепи смещения и шума усилителя.

Отнесенное ко входу приемника результирующее среднеквадратическое значение шумового тока:

$$(i_T)^2 + (i_{\text{amp}})^2 = (4kTBF_n)/R_L, \quad (6.16)$$

где $k = 138 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура, °К; B – ширина полосы пропускания для шума, МГц; F_n – коэффициент шума предварительного усилителя; R_L – эффективное входное сопротивление нагрузки, Ом.

Отношение сигнал/шум электронного приемника с учетом влияния фотодиода:

$$\text{SNR} = (G \cdot i_d^2) / [i_n^2 + (4kTBF_n)/R_L], \quad (6.17)$$

где G – усиление фотодиода.

Расчет шумовых характеристик приемника, выполненного на основе наиболее широко распространенного лавинного фотодиода – InGaAs, который предполагается использовать в структуре составного тракта К-3600 в спектре до 18,6 МГц, с темновым током 5 нА и лавинным усилением 25. Чувствительность ЛФД составляет 0,86–25 А/Вт, а лавинный фототок 42,9 мкА. Резистор в цепи смещения детектора имеет сопротивление 4000 Ом. Коэффициент шума предварительного усилителя равен 1,5 дБ. Предположим, что на вход приемника поступает световой сигнал мощностью 27 дБм.

Сначала вычислим шумовые составляющие. Из уравнения (6.10): тепловой шум $(I_{\text{Th}})^2 = 2,62 \times 10^{-16} \text{ А}^2$, квантовый дробовый шум $(I_{\text{Qsh}})^2 = 1,97 \times 10^{-17} \text{ А}^2$, избыточный лавинный шум: при $k = 0,4$, избыточный коэффициент шума при лавинном усилении 25: $F(25) = 11,2$, $(I_{\text{ex}})^2 = 6,92 \times 10^{-15} \text{ А}^2$.

В результате суммарный шумовой ток $(I_n)^2 = 7,2 \times 10^{-15} \text{ А}^2$, а отношение сигнал/шум $\text{SNR} = 75,9$ дБ.

Таким образом, в результате предварительной оценки шумовых характеристик источников излучения и приемников можно сделать вывод, что при использовании одномодового одночастотного источника излучения с распределенной обратной связью (DFB), изолятора и приемника, на основе лавинного фотодиода, достигается требуемое соотношение сигнал/шум составного тракта для системы передачи К-3600.

Однако, принимая во внимание тот факт, что подобного типа источники дороги (несколько тысяч \$USD), можно рассмотреть вопрос использования более дешевых источников, например, одномодовых лазеров со среднеквадратической шириной спектра излучения ≈ 2 нм.

Усредненные характеристики передающего модуля ТПМ-150АМ

Параметр	Min	Тип	Max
Длина волны, нМ	1530	1550	1570
Полуширина, нМ	–	1,5	3
Мощность, мВт	2,0	–	–
Порог. ток, мА	10	25	30
Рабоч. ток, мА	–	70	80
Рабоч. напр. ЛД, В	1,5	1,7	2,2
Ток фотодиода, мкА	100	–	350

Структурная схема включения ЭОМ в аналоговый линейный тракт представлена на рис. 6.13.

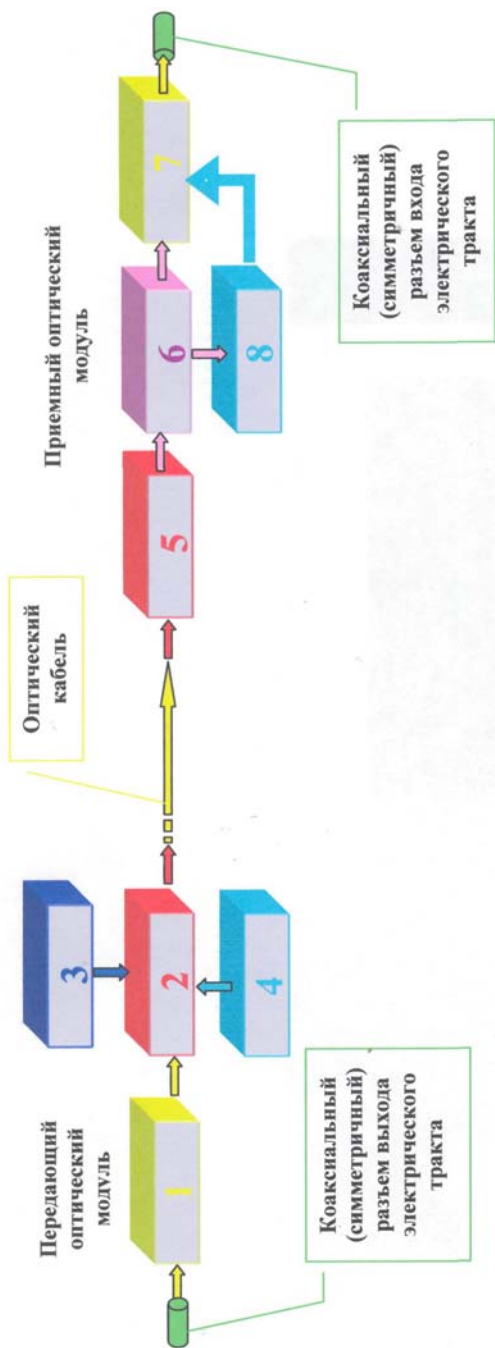


Рис. 6.13. Структурная схема использования ЭОМ в линейном тракте (одно направление передачи):

- 1 – блок согласования уровней по передаче, 2 – лазерный модуль,
- 3 – блок стабилизации температуры источника, 4 – блок стабилизации мощности излучения,
- 5 – фотоприемное устройство, 6 – аттенуатор,
- 7 – блок согласования уровней по приему, 8 – корректирующий усилитель

6.8. Применение ЭОМ в составе цифровых линейных трактов

Применение ЭОМ в составе цифровых линейных трактов благодаря их универсальности мало чем отличается от использования в составе аналоговых

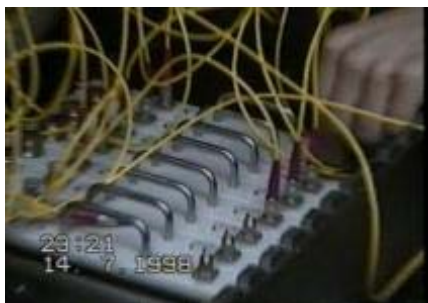


Рис. 6.14. Подключение ЭОМ-ов в НРП

трактов (рис. 6.14). Это объясняется тем, что точно так же как источник излучения можно модулировать по интенсивности аналоговым сигналом при стабилизированной мощности излучения, его можно модулировать и линейным взвешенным кодом ЦСП, например, кодом 5B6B. Требования к характеристикам источников излучения в данном случае даже несколько

ниже, особенно в части шумовых характеристик, что объясняется существенно более высокой помехозащищенностью цифрового сигнала [7, 12, 58].

Основной особенностью применения волоконно-оптических вставок в составе цифрового тракта является то, что в линейных регенераторах ЦСП импульсная последовательность формируется с предискажениями, соответствующими длине регенерационного участка металлического кабеля. Прежде всего, длительность переднего фронта импульса на выходе регенератора должна быть согласована с протяженностью участка регенерации таким образом, чтобы на приемном конце линии восстановление импульсной последовательности происходило с требуемым значением ВВЕР. Аналогично корректируется плоская вершина импульса. В результате форма импульсного сигнала на выходе корректирующего усилителя будет иметь вид рис. 6.15, а, на выходе линии – 6.15, б.

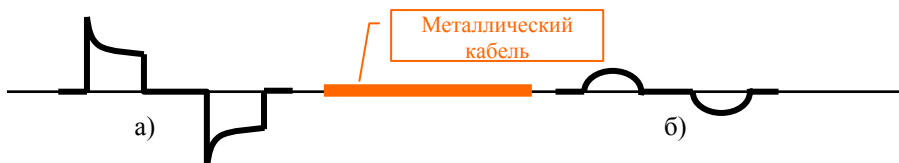


Рис. 6.15. Эпюры напряжений цифрового линейного кода на выходе: а – регенератора и б – линии

Дисперсионные характеристики ВОЛС входящей в состав цифрового тракта принципиально отличны от дисперсионных характеристик металлических кабельных цепей, поэтому форма импульсной последовательности линейного кода на выходе оптической линии будет совершенно иной. При сравнительно небольшой протяженности оптического кабеля вставки и

большой широкополосности одномодового оптического волокна искажений импульсного сигнала практически не будет.

В связи с этим фактом на вход корректирующего усилителя линейного регенератора будет поступать сигнал не той формы, на которую настроена его АЧХ при работе по металлическим цепям, и работоспособность тракта будет нарушена.

Избежать этого явления можно, если в состав ЭОМ, а точнее в приемный оптический модуль ввести регулируемую искусственную линию, параметры которой будут соответствовать длине металлической кабельной цепи и регулироваться в зависимости от ее протяженности.

6.9. Другие варианты использования ЭОМ

Реконструкция существующих металлических линий связи с переходом на цифровое оборудование неизбежно связано с уменьшением длины участка регенерации по сравнению с усилительным. При этом достаточно часто возникает проблема размещения необслуживаемых регенерационных пунктов по трассе в неудобных для эксплуатации местах (реки, железные дороги, автотрассы и пр.). Перенос этих пунктов в другое место связан либо с ухудшением качественных характеристик передачи трактов, либо с увеличением затрат на реконструкцию и снижением надежности линии за счет появления дополнительного оборудования [57, 59].

Этот факт вызывает необходимость поиска путей увеличения длины участка регенерации металлической линии связи. Одним из вариантов проведения реконструкции и исключения проблем с установкой линейных регенераторов в неудобном месте является организация составных трактов.

Составной тракт предполагает введение в состав существующего тракта на металлическом кабеле участка волоконно-оптического кабеля и размещении электрооптических модемов в имеющихся контейнерах необслуживаемых пунктов (рис. 6.16).

Основное использование подобного решения оправдано там, где требуется передача больших объемов информации и затраты на новое строительство ВОЛС будут велики, по сравнению с вариантом сохранения существующего кабеля, прежде всего это внутризоновые и сельские линии связи.



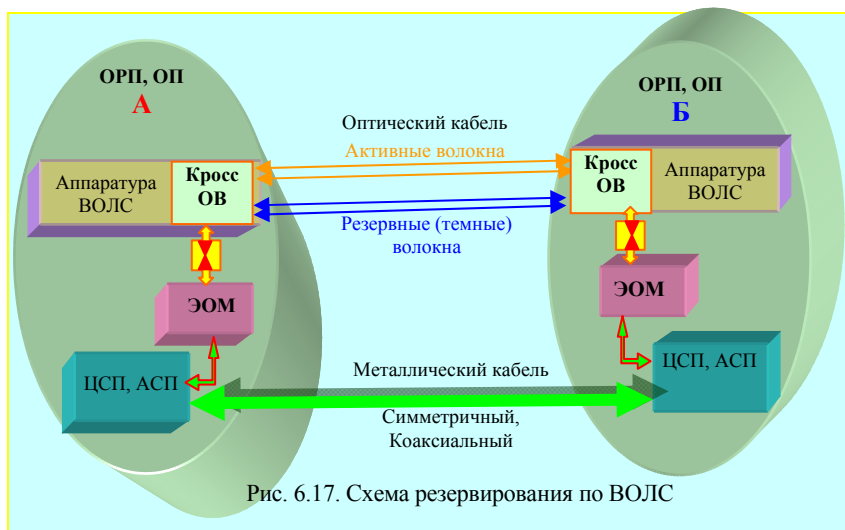
Рис. 6.16. Структура составного тракта

Эффективность подобного решения обусловлена сокращением объема строительно-монтажных работ при реконструкции, с одной стороны, и сохранением общей структуры существующей линии связи на конкретном участке сети с другой.

Следующий вариант использования ЭОМ в структуре линейных трактов, организованных по металлическим линиям связи, состоит в организации системы резервирования этих трактов по ВОЛС.

Как известно, развитие сети и строительство новых ВОЛС осуществляется с использованием существующих сооружений связи. Имеются в виду здания, фундаментальные объекты и пр., где располагается оборудование связи. Расстояния между этими пунктами, как правило, не превышает 100–150 км. Очень часто возникает ситуация, когда волоконно-оптические кабели прокладываются как бы параллельно существующим металлическим, или возможно создать обходные направления по ВОЛС для линейных трактов по металлическим кабелям, т. е. с развитием волоконно-оптической сети и наличием на ее участках резервных (темных) волокон возникает возможность организовать их резервирование по ВОЛС с использованием ЭОМ.

Безусловно, параметры ЭОМ, которые могут быть применены для этих целей, будут отличаться от работающих на короткие расстояния. Однако принцип их построения остается прежним.



В таком варианте может быть организовано как «горячее», так и «холодное» резервирование трактов (рис. 6.17), работающих по металлическим

кабелям. Переключение трактов на ВОЛС в помещении ОРП или ОП может занимать несколько минут, что обеспечит нормальное проведение ремонтно-восстановительных работ на металлических кабелях.

6.10. Линейная часть ВОКВ для металлических линий связи

В настоящее время известны и наиболее широко используются в практике эксплуатации несколько типов временных волоконно-оптических кабельных вставок (ВОКВ) [58, 60], предназначенных для развертывания на длинах усилительных участков (УУ) или участков регенерации (УР) трактов аналоговых или цифровых систем передачи, работающих по металлическим кабелям.

Их отличие состоит в особенностях развертывания, подключения, а также протяженности сегмента вставки, что, естественно, сказывается на скорости их развертывания и опτικο-электрических параметрах.

Прежде всего, рассмотрим вариант использования ВОКВ протяженностью до 4,0 км (рис. 6.18).

Эта вставка позволяет покрывать всю протяженность участков таких систем передачи, как



Подготовка к подключению оптической муфты



Процесс развертывания первого элемента ВОКВ



Процесс развертывания элемента ВОКВ из ремонтной машины



Ремонтная машина в рабочем состоянии



Внешний вид временной оптической муфты в полевых условиях

Рис. 6.18. Одноэлементная ВОКВ протяженностью до 4 км

LA-140×2, а при последовательном соединении двух ВОКВ и К-1920. Вставка оборудована временными муфтами, позволяющими производить оперативное подключение кабеля вставки к ЭОМ. Размер муфт выбран таким, что она вместе с кабелем вставки может быть протянута в канал кабельной канализации или трубу на переходах через железные дороги и шоссе. Вставка оборудована специальным размоточным устройством, которое позволяет осуществлять многократные циклы ее развертывания. Одним из основных недостатков подобной вставки является ее вес, который, в зависимости от типа кабеля вставки лежит в пределах 130–150 кг, что позволяет производить развертывание вставки только с автомашины.

Другим вариантом реализации временной вставки является составная ВОКВ (рис. 6.19), состоящая из нескольких, как правило, до 8 отрезков волоконно-оптического кабеля, протяженностью до 1000 м, который размещен на небольших барабанах. При этом волокна оптического кабеля оконцованы разъемами типа FC/PC, а соединение волокон осуществляется в специальном герметизированном контейнере. Вес одного барабана с кабелем обычно не превышает 32–34 кг, что позволяет производить развертывание вставки вручную.

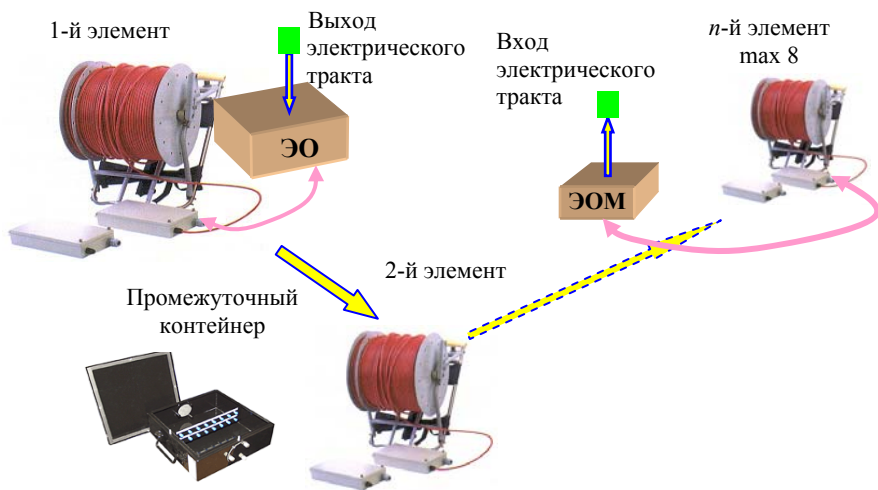


Рис. 6.19. Составная ВОКВ

Однако наличие достаточно большого числа соединителей не только ухудшает параметры вставки, но и значительно увеличивает время ее развертывания.

В процессе развертывания любого из типов ВОКВ кабель вставки ис-

пытывает различного рода механические нагрузки, а также происходит многократное соединение оптических волокон либо непосредственно с аппаратурой, либо непосредственно друг с другом в составных ВОКВ. Это приводит к необходимости разработки методики контроля параметров ВОКВ, оценки ее пригодности к дальнейшему использованию, а также определения срока службы вставки в целом и отдельных ее элементов.

6.11. Волоконно-оптические кабельные вставки для ВОЛС

Так же как и на металлических линиях связи, временные волоконно-оптические вставки применяются и в структуре трактов ВОЛС с некоторыми особенностями.

Учитывая значительно большую длину участка регенерации на ВОЛС, пропадает необходимость применения ЭОМ в составе ВОКВ. Это определило структуру ВОКВ для ВОЛС только в составе линейной части [61, 62].

Вставки ремонтные оптические короткие. Предназначены для аварийного, временного восстановления работы волоконно-оптической линии связи при повреждении оптического кабеля. Протяженность кабеля вставки до 250 м, что обусловлено спецификой механических повреждений оптических кабелей, которая состоит в том, что волокна кабеля в процессе повреждения могут быть вытянуты из модуля или трубки. Оценка расстояний, на которых могут быть повреждены волокна от места повреждения кабеля, составляют ± 100 м. Кроме того, возможно проникновение влаги в поврежденную оболочку кабеля.

Подключение поврежденного оптического кабеля к кабелю вставки осуществляется с помощью механических соединителей типа Corelink или Fibriok. При таком способе подключения на каждом конце кабеля вставки монтируется временная оптическая муфта, внутри которых располагаются приспособления для крепления механических соединителей и оптических волокон кабелей (рис. 6.20).



Временная оптическая муфта типа GPJ-F, либо отечественная – МТОК-96

Рис. 6.20. Короткая ВОКВ

Волокна поврежденного кабеля с помощью механических соединителей подключаются к волокнам кабеля вставки.

Это наиболее быстрый и эффективный способ восстановления связи на поврежденном участке или организации и проведении ремонтно-восстановительных работ. Время развертывания такой вставки лежит в пределах 2–3 ч.

Многоэлементные ВОКВ. Достаточно часто в структуре СТЭ ВОЛС возникает необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ на строительной длине магистрального оптического кабеля. В этом случае возникает желание осуществить временное резервирование всей строительной длины, протяженность которой достигает 6 км.

Решение этой задачи возможно двумя способами:

- применением многоэлементных ВОКВ, аналогичных описанным выше для металлических линий связи.
- развертыванием одноэлементной ВОКВ.

Структура многоэлементных ВОКВ для ВОЛС остается практически такой же (рис. 6.21) за некоторыми исключениями. Вместо ЭОМ появляются оконечные элементы **3**, обеспечивающие подключение ВОКВ к магистральному кабелю, а также элементы соединения волокон кабеля вставки **2** между собой.

Оконечный элемент подключения ВОКВ к магистральному кабелю представляет из себя пиг-тейл с числом ОВ, равным числу ОВ кабеля вставки, оконцованный с одной стороны коннекторами типа FC/PC, другой конец введен в оптическую муфту типа МТОК-96, MOM-у, FOSC-400 и подготовлен к соединению с волокнами магистрального кабеля тем или иным способом.

Основным недостатком применения многоэлементных ВОКВ на ВОЛС является наличие большого числа разъемных соединений, что приводит – во первых, к росту потерь на вставке, во вторых к росту возвратных потерь и существенному возрастанию дисперсии на данном участке.

При максимальной протяженности строительной длины в 6 км и длине элемента вставки в 1 км, на этом участке необходимо будет установить 6 последовательно соединенных элементов. При этом минимальное число разъемных соединений будет равно 7. Если предположить, что потери в разъемных соединениях не превышают 0,2 дБ, а потери в волокне вставки не более 0,22 дБ/км, нетрудно сосчитать, что суммарные потери на вставке будут, как минимум: $A_{\text{ВОКВ}}=7 \cdot 0,2 + 6 \cdot 0,22=2,72$ дБ, и это без учета потерь в местах соединения с магистральным кабелем.

Если сравнить эти цифры со значением системного запаса (см. 2.5),

может оказаться, что данная вставка на конкретной ВОЛС работать не будет, так как бюджет линии не будет соответствовать системному запасу.

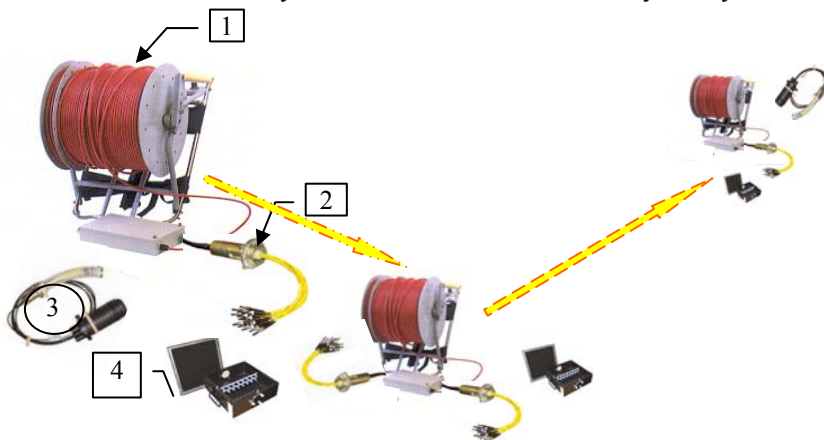


Рис. 6.21. Многоэлементная вставка для использования на ВОЛС:

- 1 – кабельный элемент ВОКВ,
- 2 – гибкий элемент подключения вставки к кроссу с розетками типа FC/PC,
- 3 – гибкий элемент подключения вставки к магистральному ВОК с муфтой типа МТОК – 96,
- 4 – промежуточный контейнер для соединения элементов вставки

Вторым важным фактором, определяющим возможность использования многоэлементной ВОКВ на заданной ВОЛС, является скорость передачи. Чем выше скорость передачи, тем жестче требования к суммарной дисперсии в оптическом тракте.

При установке многоэлементной вставки с большим числом разъемных соединений возникает множественное число отражений от каждого элемента вставки в силу незначительной протяженности элемента и, соответственно, малых потерь в нем.

Так, например, уровень возвратных потерь в стандартных разъемах типа FC/PC не превышает 40–45 дБ, что приводит к росту искажений импульсных сигналов на каждом разъемном соединении до 3–5%, а при коротких длинах оптического волокна, как на одном элементе вставки, суммарные искажения могут достигать значительных величин.

Это сказывается на возможности использования многоэлементных ВОКВ на ВОЛС, где организованы высокоскоростные тракты. По предварительным оценкам это уровень STM-4 (622 Мбит/с) и выше.

Однако применение таких вставок оправдано тем, что вес одного эле-

мента не превышает 32–34 кг и он может быть развернут вручную. Это важно в условиях прохождения трассы ВОЛС в сложно пересеченной местности. Остальные элементы ВОКВ устанавливаются без проблем.

Одноэлементные ВОКВ. В отличие от многоэлементной ВОКВ, одноэлементная представляет из себя размоточное устройство с кабелем протяженностью до 6 км, что позволяет избавиться от дополнительных и возвратных потерь в разъемных соединениях. Большая протяженность оптического кабеля, большой размер барабана размоточного устройства и, соответственно, большой вес (более 300 кг), делают неудобным процесс развертывания вставки. Поэтому в данном варианте одноэлементную вставку разделяют на две. Все зависит от конкретной ситуации, где предполагается развертывать вставку. Например, это могут быть соотношения длин элементов 3 + 3 км или 4 + 2 км. При двух элементах получаются всего лишь 3 разъемных соединения, что существенно улучшает оптические параметры ВОКВ, но ее развертывание может быть осуществлено только с машины.

6.12. Монтажные и измерительные работы на ВОЛС в процессе строительства и эксплуатации

Монтаж всех элементов ВОЛС в полевых условиях осуществляется **обязательно** в монтажной машине (передвижной лаборатории), что обеспечивает:

- защиту монтируемых элементов от воздействия атмосферных факторов;
- препятствует попаданию пыли, грязи и пр. в конструкцию оптических элементов;
- нормальные условия работы технического персонала, так как эта работа требует особого внимания и высокой сосредоточенности;
- выполнение всех технологических операций при плюсовых температурах, так как большинство приборов и устройств для монтажа ВОЛС не могут работать или не обеспечивают требуемого качества процесса при отрицательных температурах;
- маневренность и доступность связи с пунктами по трассе ВОЛС.

В качестве примера реализации передвижной лаборатории может служить технологическая машина для выполнения полевых работ на ВОЛС, предложенная ОАО «РОСТЕЛЕКОМ» [51, 52]. В состав машины входит достаточно много необходимого оборудования, инструментов и материалов.

Примерный состав оборудования лаборатории (рис. 6.22):

- автомобиль, например типа «ГАЗ-27057».

Измерительное оборудование:

рефлектометр «MTS-5100»;

оптический телефон «PHOTOM 450»;

трассоискатель «ЗМ»;

источник оптического излучения «WG-OLS-15»;

измеритель «WG-OLP-15A»;

нормализующая длина – катушка оптического волокна $L=1,5$ км.



Вид снаружи

Вид изнутри

Рис. 6.22. Передвижная лаборатория по монтажу, ремонту и восстановлению ВОК

Монтажное оборудование:

сварочный аппарат «FSM 40S»;

скалыватель СТ-20 – 2 шт.;

комплект инструмента «НИМ 25»;

инструмент для монтажа защитной полиэтиленовой трубки (ЗПТ);

муфты MOM-у, МТОК-96, FOCS-400 в количестве 4 шт. (как минимум);

муфты для ЗПТ в количестве ... шт.;

теплоэлектровентилятор;

электрофен;

средства радиосвязи.

Средства скорейшего восстановления связи, располагаются, как правило, в другой машине (рис. 6.17):

- волоконно-оптическая кабельная вставка – короткая, $L=250$ м;
- многоэлементная, длина элемента $L_{эл}=0,8-1,0$ км, количество элементов определяется конкретно для данной ВОЛС;
- одноэлементная $L_{эл}=(3+3)$ км или $L_{эл}=(4+2)$ км; все варианты кабельных вставок должны быть полностью укомплектованы в соответствии с

технической документацией на вставку;

- бензоэлектростанция 220В; 3,5 кВА;
- комплект исполнительной документации на ВОЛП.

Для работы на волоконно-оптическом кабеле необходимо оборудование для проведения земляных работ, которое размещается отдельно в специальном отсеке, либо на другом автомобиле: палатка кабельная – 2 шт., стол монтажный – 2шт., бензопила, кабель вводной, электронасос погружной с пожарным рукавом, электромолоток, набор слесарных инструментов, инструменты (лопаты, лом, топор), светильники, штырь заземления; держатель кабельный, удлинитель для электроинструмента на катушке; спецодежда; аптечка; противопожарные средства.

Состав аварийной (ремонтно-восстановительной) бригады – 5 чел.

Для проведения двухсторонних измерений на оконечных пунктах входят 2 измерителя (по одному с каждой стороны) с рефлектометром и оптическим тестером.

Основные выводы, которые можно сделать даже из простейшего анализа ситуации, связанной с вопросами совершенствования системы технической эксплуатации ВОЛС (по крайней мере, в России):

- работы, направленные на построение совершенных систем мониторинга ВОЛС, безусловно, обеспечивают должное выполнение основной своей функции – обнаружение причины отказа и возникновение места повреждения, даже отказов развивающихся во времени, однако из-за высокой стоимости оборудования и программного обеспечения эти системы применяются только на уровне магистральных ВОЛС с большим объемом трафика;

- ни одна система мониторинга не способна восстановить линию или устранить отказ (оборудования аппаратуры ВОЛС, линейного тракта, и, тем более, кабеля), да эта задача и не ставится перед ней;

- для обеспечения параметров надежности ВОЛС, которые можно встретить в различных нормативных документах, необходимо совершенствовать систему технической эксплуатации, прежде всего, с точки зрения построения системы обслуживания и выполнения аварийно и ремонтно-восстановительных работ непосредственно на трактах ВОЛС с привлечением дополнительного современного оборудования и средств.

6.13. Контроль характеристик ВОКВ

Использование ВОКВ в структуре системы технической эксплуатации как линейных трактов на металлическом кабеле, так и ВОЛС, предполагает

оценку их характеристик с точки зрения проведения контроля параметров ВОКВ [14, 19, 60].

Целесообразно остановиться на измерении и наблюдении за следующими основными характеристиками, изменение которых может возникать в процессе эксплуатации ВОКВ [14, 19, 60]:

- механические нарушения:
 - повреждения оптического кабеля в процессе развертывания вставки;
 - повреждения компонентов коммутации элементов вставки;
 - отказы конструкции размоточного устройства, особенно для одноэлементных ВОКВ с большим количеством кабеля;
- рост затухания в оптических волокнах кабеля вставки и его изменение, происходящее в процессе многократного развертывания;
- потери в разъёмных соединениях и их изменение при многократном соединении;
- возможное возникновение неоднородностей в волокнах (микротрещин), возникающих в результате многократных изгибов и растяжений при развертывании ВОКВ.

В качестве основного способа, применяемого для контроля характеристик оптических волокон и линий связи, является рефлектометрический, основанный на измерении обратного рассеяния [43, 44]. С помощью современных рефлектометров удастся наглядно наблюдать изменение затухания вдоль оптического волокна, включая скачки затухания, вызванные оптическими контактами и т. п., и быстро определять места неисправностей и источников искажений. На рис. 6.23 приведена типичная кривая обратного рассеяния, наблюдаемая на экране рефлектометра. Отмечены отрезки линии передачи с искажениями различного вида. Нормальный ход кривой **1** в волокне представляет собой падающую экспоненту обратного рассеяния во времени, искажение **2** – скачок затухания, обусловленный потерями в месте сварки, по его величине судят о качестве сварного соединения, так как скачок затухания пропорционален вносимым потерям. В случае сварки двух волокон с различным обратным рассеянием, а также волокон + **NZDS** и **-NZDS** в кривой также возникает скачок **5**, который может стать положительным при большом рассеянии во второй линии. Маленькие пузырьки воздуха, включения в волокне, микротрещины отражают свет, что проявляется на кривой обратного рассеяния в виде небольших выбросов **3**. При несогласованных разъемах или плохом их качестве возникают отражения и скачок затухания **4**. Интенсивный отраженный сигнал **6** возникает от конца волокна.

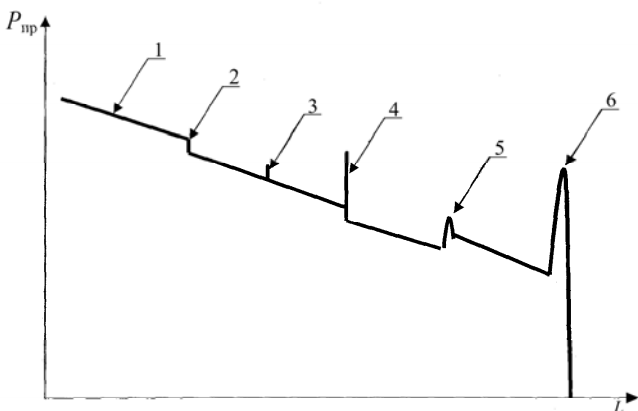


Рис. 6.23. Типичная кривая обратного рассеяния с различными видами изменения затухания: 1 – ход кривой в однородном волокне, 2 – скачок затухания в месте сварки, 3 – отражение от неоднородности в волокне (микротрещина), 4 – скачок затухания плюс отражение в месте разъемного соединения, 5 – соединение волокон с различным обратным рассеянием, 6 – отражение от конца волокна

Свет, проходящий по волокну, претерпевает экспоненциальное затухание, т. е. величина P потока в волокне после прохождения волокна длиной x определяется выражением:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha x} = P_0 \cdot e^{-(\alpha_a + \alpha_s)x}, \quad (6.18)$$

где коэффициент затухания α является мерой затухания, он может быть разделен на коэффициенты поглощения α_a и рассеяния α_s .

Следует подчеркнуть, что α_a и α_s должны быть постоянны по всей длине волокна. На практике это условие в большинстве случаев выполняется. Исключения ограничены локальными отклонениями.

Рассеянный свет распространяется во все стороны и покидает волокно почти полностью. Однако небольшая часть рассеянного света распространяется по волокну обратно и лежит в пределах возможного угла распространения.

Распространяющийся в обратном направлении свет составляет долю от общего рассеянного света, определяемую коэффициентом

$$G = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{(NA)^2}{4n_0}, \quad (6.19)$$

где n_0 – максимальный коэффициент преломления сердцевины волокна; NA – его числовая апертура; Ω – соответствующий пространственный угол в волокне.

Считается, что обратное рассеяние не превышает рассеяния в других направлениях (для $n_0=1,46$, $NA=0,20$, $\Omega=6,8 \cdot 10^{-3}$, $G=-22$ дБ). В градиентных волокнах G еще меньше (около -24 дБ), так как интенсивность света и угол распространения вне сердцевины волокна уменьшаются и поддаются расчету для случая чисто релеевского рассеяния. Для дотированных кварцевых и стеклянных волокон это условие выполняется не всегда, поэтому выражение (6.19) дает лишь оценку.

Интервал измерения Δx в волокне зависит от длительности зондирующего импульса и для гауссовых импульсов

$$\Delta x = (c / n_g) \cdot \Delta(t), \quad (6.20)$$

где Δt – половина длительности измерительного импульса; c – скорость света в вакууме; $n_g=n_0=(1-(\lambda/n_0) \cdot dn_0/d\lambda)$ – групповой коэффициент преломления сердцевины волокна.

Измерение потерь в волокнах вставки. Технология проведения контрольных измерений, вносимых волокнами вставки потерь, и их изменение в процессе эксплуатации вставки по методу обратного рассеяния необходимо производить при использовании нормализующей длины (рис. 6.24) [63]. Катушка нормализующая предназначена для устранения «мертвой зоны» оптических рефлектометров при проведении измерений волоконно-оптических линий связи.

Компенсационная катушка выполнена в прочном металлическом корпусе, что позволяет использовать ее в полевых условиях.

Это обеспечит возможность использования зондирующих импульсов малой длительности, что в свою очередь приведет к высокому значению разрешающей способности. Таким образом, схема для проведения измерений потерь в оптических волокнах вставки будет выглядеть следующим образом – рис. 6.25.

Представленная схема измерения параметров ВОКВ позволяет не только контролировать состояние оптических волокон кабеля вставки, но и количественно оценивать величину потерь в разъемных соединениях, что показано на рефлектограмме рис. 6.26.



Рис. 6.24. Катушка нормализующая:
тип оптического волокна (по заказу) SSF, DSF, +NZDS, –NZDS;
длина волокна – 1000 м; тип оптических коннекторов (по заказу) FC, SC, ST, LC;
габариты, мм – 210×170×60

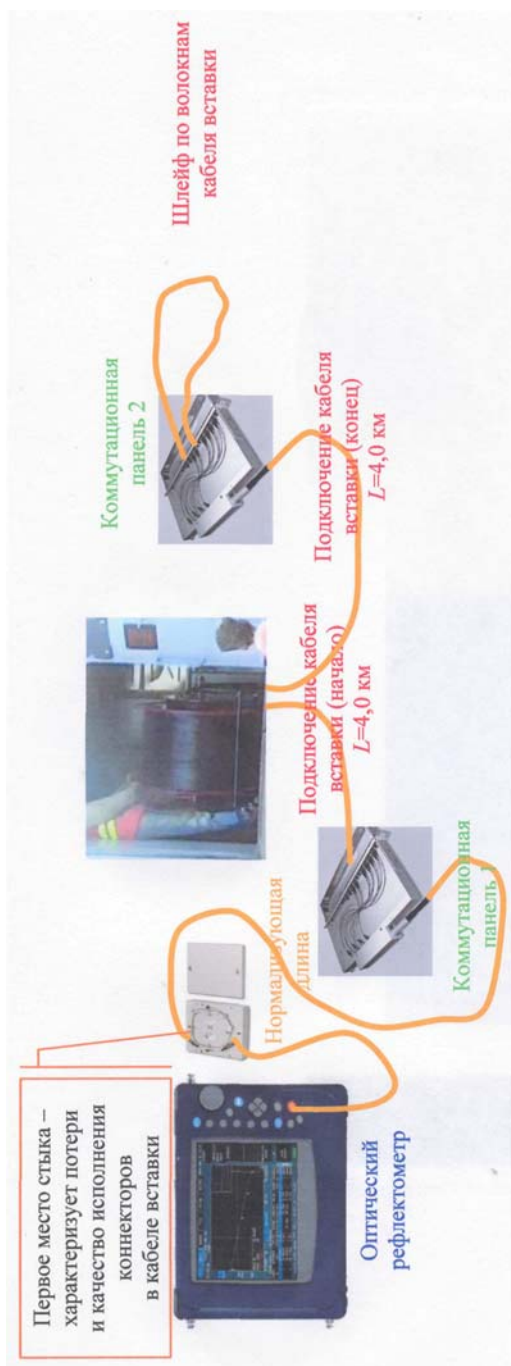


Рис. 6.25. Схема проведения измерения параметров ВОКВ

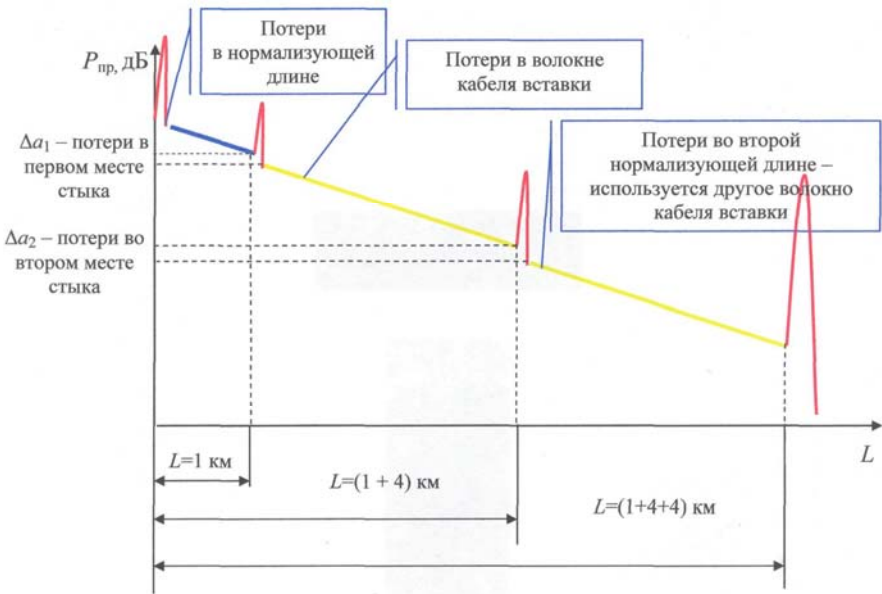


Рис. 6.26. Эпюра рефлектограммы измерения потерь в кабеле и коннекторах вставки

Потери в местах стыка – Δa_1 и Δa_2 не должны превышать 0,2 дБ для одноэлементной вставки. Потери в кабеле вставки будут зависеть от того, на каких длинах волн конкретная вставка будет работать.

Предложенная схема контроля параметров вставки позволяет определить все потери в ее элементах – как в первом месте стыка, так и во втором.

В процессе эксплуатации ВОКВ происходит изменение ее параметров и за этим изменением приходится следить. Основной вопрос – как изменяются параметры вставки в зависимости от количества циклов развертывания?

Выражения для расчета средних характеристик изменения параметров волокон вставки в процессе эксплуатации имеют вид:

$$\Delta a_{\text{ов}} = \sum_{j=1} \left\{ a_{\text{ов}}(m) - \frac{a_{\text{ов}}(0)}{n} \right\}, \quad \Delta a_{\text{рс}} = \sum_{j=1} \left\{ a_{\text{рс}}(m) - \frac{a_{\text{ов}}(0)}{n} \right\}, \quad (6.21)$$

где $\Delta a_{\text{ов}}$ – среднее значение потерь в оптических волокнах после m -го цикла развертывания, $\Delta a_{\text{рс}}$ – среднее значение потерь в разъёмных соединениях после m -го цикла, n – число оптических волокон в кабеле вставки.

Среднеквадратическое отклонение роста потерь в волокнах кабеля вставки и разъёмных соединениях рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{\text{ок}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{\Delta a}_{\text{ок}} - \Delta a_{\text{оки}})}{n^2}}, \sigma_{\text{рс}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{\Delta a}_{\text{ок}} - \Delta a_{\text{рси}})}{n^2}}. \quad (6.23)$$

Исследования параметров ВОКВ в процессе эксплуатации можно представить для конкретной вставки, так как вариантов применения последних очень много.

В качестве примера приведем изменение параметров вставки в процессе ее эксплуатации, которая содержит 16 одномодовых оптических волокон типа SSF, общая длина кабеля вставки 3,78 км, все волокна оконцованы коннекторами типа FC/PC, протяженность нормализующей длины 980 м, измерения проводились рефлектометром Anritsu (рис. 6.27) непосредственно после выпуска вставки (исходное состояние), а затем после каждых 5 циклов развертывания.



Рис. 6.27. Рефлектометр ANRITSU

Контролировались следующие параметры:

- потери в кабеле вставки и их рост;
- потери в разъемных соединениях.

Результаты измерений представлены на диаграмме (рис. 6.28).

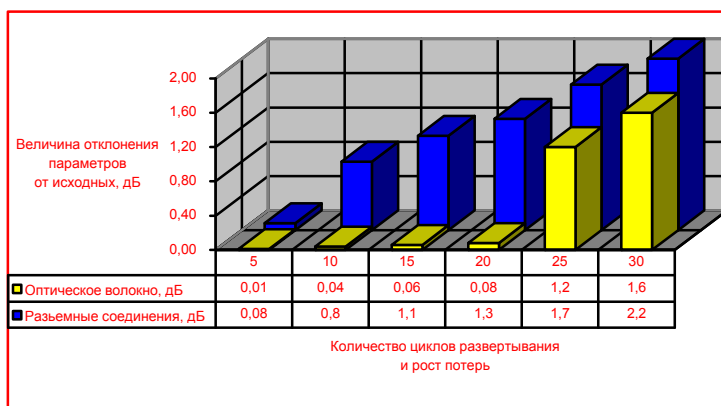


Рис. 6.28. Диаграмма роста потерь

Нетрудно убедиться, что после 10 циклов развертывания отклонения не превысят: $\pm 0,04$ дБ, после 30 циклов $\pm 0,8$ дБ в волокнах кабеля вставки, а разъемных соединениях $\pm 0,4$ и $\pm 1,1$ дБ соответственно.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы и предложить рекомендации по восстановлению параметров вставки:

- в районе 25–30 циклов развертывания наблюдается резкое возрастание потерь в разъемных соединениях, которое обусловлено эрозией контактных поверхностей коннекторов в результате многократного их соединения, а также возможного попадания пыли при развертывании вставки в полевых условиях;

- потери в оптических волокнах кабеля вставки растут значительно медленнее и увеличиваются, в основном, за счет появления микротрещин, в то же время километрическое затухание практически не меняется.

Изучение контактных поверхностей под микроскопом показало правильность предположения о нарушении последних.

Рекомендации, которые могут быть даны для восстановления параметров ремонтных вставок:

- проверка затухания и целостности разъемных соединений должны производиться рефлектометром не реже чем через 5 циклов развертывания;

- полученные рефлектограммы должны сравниваться с исходными, в этом случае можно сделать вывод о причинах изменения характеристик;

- для проведения измерений целесообразно использовать рефлектометр одного и того же типа;

- в случае выявления потерь в разъемных соединениях (увеличение составляет не более 5–10% от исходного значения) целесообразно провести процесс полировки торцов коннекторов с использованием специального набора инструментов;

- в случае значительного увеличения потерь (увеличение составляет 60–80% от исходного значения) необходимо заменить коннектор с помощью набора инструментов;

- при обнаружении возрастания потерь в оптических волокнах кабеля вставки необходимо провести комплекс измерений параметров составного тракта:

- если вставка используется в аналоговом тракте, необходимо провести измерения собственных и суммарных шумов;

- если вставка используется в составе тракта ЦСП, ее испытание

должно проводиться на стенде, имитирующем участок регенерации, с тестированием по значениям событий ошибок;

о если результаты измерений и тестирования будут удовлетворительными, вставку можно использовать для дальнейшей эксплуатации, в противном случае те волокна кабеля вставки, которые показали неудовлетворительные результаты, должны быть исключены из структуры составного тракта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СУЩЕСТВУЮЩАЯ ПЕРВИЧНАЯ СЕТЬ ОСНОВАНА В ОСНОВНОМ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАБЕЛЯХ СВЯЗИ, ПРИЧЕМ ПРЕОБЛАДАЮЩИМ ТИПОМ ЯВЛЯЕТСЯ СИММЕТРИЧНЫЙ КАБЕЛЬ, ПО ЦЕПЯМ КОТОРОГО ОРГАНИЗОВАНЫ ТРАКТЫ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ. РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ, ПОЯВЛЕНИЕ НОВЫХ ВИДОВ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ, РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ТРЕБУЕТ СУЩЕСТВЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМОВ ТРАФИКА НА ПЕРВИЧНОЙ И ВНУТРИЗОНОВОЙ СЕТЯХ.

В результате сложилась ситуация, когда недостаточная развитость сети на основе использования направляющих с применением волоконно-оптических кабелей связи сдерживает развитие информационных структур и вызывает необходимость предлагать разнообразные методы решения задач по реконструкции существующих магистральных и внутризоновых линий связи первичной сети для существенного увеличения пропускной способности последних.

Учитывая структуру и состояние направляющих систем электросвязи в России, предложены четыре варианта решения этой задачи.

Первый – организация цифровых трактов PDH иерархии по существующим как симметричным, так и коаксиальным кабелям связи, имеющимся на первичной сети.

Второй – полный отказ от линий связи организованных по металлическим кабелям и переход на волоконно-оптические системы передачи SDH иерархии.

Третий – создание комбинированных линейных трактов, где отдельные участки магистралей организованы по существующим симметричным или коаксиальным кабелям связи, а часть трактов в структуре магистрали организована по волоконно-оптическому кабелю.

Четвертый – реконструкция уже действующих ВОЛС с построением систем DWDM, так как потребность в увеличении пропускной способности магистральных волоконно-оптических сетей связи носит взрывной характер (она удваивается каждый год). Существующие магистральные и внутризоновые ВОЛС, использующие оптические кабели с малым количеством одномодовых оптических волокон (ОВ), часто не обеспечивают растущие потребно-

сти электросвязи и нуждаются в реконструкции.

Вышеизложенное определило построение материала книги. Рассмотрены вопросы проектирования, причем основное внимание уделено не нормативным документам, а общим задачам проектирования реконструкции или нового строительства, инженерному расчету и оценкам основных параметров новой системы.

Приведенный сравнительный анализ современных технологий строительства ВОЛС позволит объективно принять решение при выборе оптимального варианта для того или иного региона.

Безусловно, после реализации проектных решений в том или ином виде возникает задача организации эксплуатации, что требует принятия обоснованных решений по структуре построения новой системы технической эксплуатации. Эта система должна базироваться на основных теоретических положениях систем массового обслуживания, а также на статистических данных по состоянию систем связи в регионе, интенсивности потоков отказов, возможности своевременного проведения ремонтно-восстановительных работ.

Авторы выражают надежду, что книга будет представлять интерес не только для студентов старших курсов, но и для специалистов, занятых как в строительно-монтажной области, так и в области эксплуатации.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- ВОЛС – волоконно-оптические линии связи
МПС – Министерство путей сообщения
СКС – структурированная кабельная система
ВОК – волоконно-оптический кабель
PON (passive optical networks) – пассивные оптические сети
ВПЛС – воздушная подвесная линия связи
EPON – технология с ориентацией сети Internet исключительно на протокол IP и стандарты Ethernet
GPON (Gigabit PON) – масштабируемая структура кадров при скоростях передачи от 622 Мбит/с до 2,5 Гбит/с
ВОСП – волоконно-оптическая система передачи
АТС – автоматическая телефонная станция
СМР – строительно-монтажные работы
МОВ – многомодовое оптическое волокно
ООВ – одномодовое оптическое волокно
МСЭ – Международный союз электросвязи
SSF – стандартное ООВ по рекомендации МСЭ G-652
ЦСП. – цифровые системы передачи
ПЦИ – плезиохронная цифровая иерархия
МСИ – межсимвольная интерференция
ЛЭП – линии электропередачи
DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) – технология плотного волнового мультиплексирования
ОУ – оптические усилители
ФПУ – фотоприемное устройство
DSF – ООВ по рекомендации МСЭ G-653
LMF – ООВ по рекомендации МСЭ G-654
±NZDSF – ООВ по рекомендации МСЭ G-655
УФТ – усилитель фототока
ЛФД – лавинный фотодиод
ОУ – операционный усилитель
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

УЗК – устройство заготовки каналов
ЭЖД – электрофицированные железные дороги
ВЛС – воздушные линии связи
ВС – волоконный световод
СТЭЛСС – система технической эксплуатации линейных сооружений связи
БС – большие системы
ЛСС – линейные сооружения связи
КМ – кабельные магистрали
СМО – система массового обслуживания
ОРП – обслуживаемый регенерационный пункт
СОУ – служба оперативного управления
ЛКС – линейно-кабельные сооружения
КК – кабельная канализация
ТВ – телевидение
СЛС – симметричные линии связи
КЛС – коаксиальные линии связи
НРП – необслуживаемый регенерационный пункт
НУП – необслуживаемый усилительный пункт
RFTS (Remote Fiber Test System) – система тестирования волоконно-оптического тракта
ГИС – геоинформационная система (привязка ВОЛС к местности)
RTU (Remote Test Unit) – блоки дистанционного тестирования
OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – оптический рефлектометр
OTAU (Optical Test Access Unit) – модуль доступа для тестирования оптических волокон
TSC (Test System Control) – центральный блок управления системой
ONT (Optical Network Terminal) – станции контроля сети
ARFTS (Advanced Remote Fiber Test System) – система непрерывного мониторинга по принципу «да-нет»
ВОКВ – временная волоконно-оптическая кабельная вставка
ЭОМ – электрооптические модемы
АСП – аналоговые системы передачи

ЛИТЕРАТУРА

1. www.RusCable.Ru
2. СО 153-34.48.519-2002. Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 0,4–35 кВ. – М., 2002.
3. *Спиридонов, В.Н.* Цели и задачи технического надзора при строительстве ВОЛС // *Lightwave*. 2004. № 2.
4. ИТ-2.4.2. Проектирование волоконно-оптических линий связи / СПБЦЭ. – СПб, 2009.
5. www.magistral-skn.ru/Oshibki_pri_sozdanii_VOLS_Kolosov_A.N.
6. www.nsgate.ru
7. Измерение коэффициента ошибок в цифровых системах передачи / *Е.Б. Алексеев, А.В. Курилов, Т.В. Дубкова, П.А. Посвянский* // *Электросвязь*. 1978. № 10. – С. 18.
8. Вопросы измерения коэффициента ошибок высокоскоростных трактов передачи / *Е.Б. Алексеев, А.В. Курилов* // *Полупроводниковая электроника в технике электросвязи: сб.* 1980. Вып. 2.
9. Нормы на электрические параметры аналоговых и цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновой первичных сетей. Введены в действие приказом Минсвязи России от 10.08.97 № 92.
10. Руководящий технический материал по технической эксплуатации волоконно-оптических систем передачи на внутризоновых и магистральных первичных сетях ВСС России / ЦНИИС. – М., 1997.
11. Системы многоканальной связи / *А.М. Зингеренко, Н.Н. Баева, М.С. Тверецкий*. – М.: Связь, 1980.
12. Междугородные симметричные кабели для цифровых систем передачи / *А.Ю. Цым, В.И. Камалягин*. – М.: Радио и связь, 1984.
13. Проектирование и техническая эксплуатация линейных сооружений связи / *С.М. Верник, Ю.М. Ежов, Б.К. Никитин, О.Г. Патрик*; ЛЭИС. Л., 1988.
14. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: учеб. пособие / *М.С. Былина, С.Ф. Глаголев, Л.Н. Кочановский, В.В. Пискунов*; СПбГУТ. – СПб, 2002.
15. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / *А.Б. Иванов*. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999.

16. Рекомендации МСЭ, 1994.
17. www.c-tt.ru/content
18. kunegin.narod.ru
19. Оптимизация линий связи первичных сетей / С.Ф. Глаголев, Б.К. Никитин; СПбГУТ. – СПб, 2004.
20. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи / Э.А. Шевцов, М.Е. Белкин. – М.: Радио и связь, 1992.
21. Операционные усилители / И. Достал; пер. с англ. – М.: Мир, 1982.
22. Оптические системы передачи / Д. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989.
23. www.tkc.ru
24. Строительство и эксплуатация ВОЛС на первичной сети / Б.К. Никитин, Е.Б. Стогов // www.connect.ru. 2008. № 7.
25. www.teralink.ru
26. Прокладка оптических кабелей в трубах / В. Гриффьен; СПб, 2001.
27. www.opten.spb.ru
28. www.tvertp.fis.ru
29. www.telecom.tomsk.su
30. Пассивные оптические сети PON. Ч. 1. Архитектура и стандарты / И.И. Петренко, Р.Р. Убайдуллаев // Lightwave Russian Edition.,2004.
31. www.elcabel.ru
32. www.skonline.ru
33. Волокно на весу 2 / В. Каток, А. Ковтун, И. Руденко. www.comp-doc.ru
34. «Высоковольтная» связь: технические заметки, 2003. www.opticlecom.ru
35. Патент 2073290. Способ навива кабеля на провода и устройство для его осуществления / Б.К. Никитин Б.К., А.М. Кузнецов и др.; приоритет 19.01.94.
36. Навивная технология. Экономичное строительство загородных ВОЛС по ЛЭП / Е.Б. Гаскевич // Connect! 2004. № 7. С. 64–66.
37. Навивная технология крепления ВОК на ЛЭП / Б.Е. Ерекешев, Б.К. Никитин // СТЛКС, 2002.
38. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов. – М.: Радио и связь, 2000.
39. Контрольно-измерительное оборудование для монтажа и эксплуатации волоконно-оптических линий связи / М.Ю. Комаров // Метрология. 1998. № 1.
40. www.trdcom.ru
41. www.tinvest.ru
42. www.syrus.ru

43. Теория измерений по методу обратного рассеяния в световодах / *Д. Шикетанц* // Зарубежная электроника. 1984. № 6. – Р. 87–94.
44. Оптимизация линейных сооружений связи / *С.М. Верник, Л.Н. Кочановский*. – М.: Радио и связь, 1984.
45. Исследование операций / *Е.С. Венцель*. – М.: Сов. Радио, 1972.
46. Сложные системы / *А.С. Шаранишане, И.Г. Железнов, В.С. Ивницкая*. – М.: Высшая школа, 1977.
47. Введение в теорию массового обслуживания / *Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко*. – М.: Наука, 1966.
48. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи / *И.Р. Берганов, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев*. – М.: Радио и связь, 1989.
49. Надежность оптических кабелей связи / *Ю.Т. Ларин*. – М.: Информэлектро, 1990. – 35 с.
50. Современные технологии проектирования строительства и эксплуатации линейно-кабельных сооружений // СТЛКС-2002: сб. тр. – СПб: ПЕТЕР-КОН, 2002.
51. Некоторые аспекты эксплуатации и надежности ВОЛС / *Б. Никитин, Е. Стогов* // Первая миля. 2008. № 2.
52. Аварийно-восстановительные работы на ВОЛС / *Л.М. Овсянников* // Фотон-экспресс. 2000. № 20.
53. Руководство по технологии и тестированию систем WDM / *Андре Жиран*; пер. с англ. под общей ред. *А.В. Шмалько*. – М.: EXFO, 2001.
54. Системы мониторинга ВОЛС / *А.В. Шмалько, Е.Б. Гаскевич, Р.Р. Убайдуллаев*. RFTS – TERALINK.
55. Система мониторинга ВОЛС / *Ю.В. Картошкин, А.Г. Клинков*. mag.gudok.info/index.php
56. Система автоматического мониторинга ONMS ATLAS. www.comtel.by
57. Повышение надежности линейных трактов систем передачи / *А.М. Кузнецов, Б.К. Никитин, Ю.А. Шелепов* // Вестник связи. 1998. № 4. С. 7–92.
58. Особенности эксплуатации волоконно-оптических кабельных вставок для систем передачи по металлическим кабелям / *Б.К. Никитин, А.М. Кузнецов, Ю.А. Шелепов, М.Ю. Шелепов, В.А. Архаров* // 52-я НТК: матлы. СПб, 1999.
59. Волоконно-оптическая кабельная вставка в составе линейных трактов на металлическом кабеле / *Б.Е. Ерекешев, Б.К. Никитин* // СТЛКС, 2003.
60. Опыт развертывания и эксплуатации ВОКВ (Исследование нестабильности параметров) / *Б.Е. Ерекешев, Б.К. Никитин* // СТЛКС, 2004.
61. Рекомендации по восстановлению работоспособности оптического

кабеля с помощью временных оптических кабельных вставок на магистральных и внутризоновых линиях передачи. www.consv.ru

62. Оборудование для ВОЛС специального назначения. www.ssk-samara.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
Глава 1. Общие принципы проектирования и основные этапы	8
1.1. Структура технического задания	8
1.2. Возможные ошибки при разработке проекта системы	20
1.3. Некоторые примеры реализации разделов технического задания	26
Глава 2. Анализ проблем при разработке проектов реконструкции действующих кабельных магистралей для расширения их пропускной способности	31
2.1. Качественные показатели функционирования цифровых трактов	31
2.2. Анализ причин, вызывающих снижение качественных показателей трактов ЦСП.....	34
2.3. Основные соотношения и расчетные выражения при реконструкции на основе организации трактов ЦСП.....	39
2.4. Реконструкция действующих кабельных магистралей на основе строительства ВОЛС	40
2.5. Расчет длины участка регенерации волоконно-оптической системы передачи (ВОСП).....	41
2.6. Реконструкция существующих одномодовых ВОЛС первичной сети	44
2.7. Параметры современных одномодовых оптических волокон.....	45
2.8. Расчет длины регенерационного участка с использованием компенсаторов дисперсии.....	49
2.9. Расчет волоконно-оптической линии связи с использованием оптических усилителей.....	54
2.10. Определение длины регенерационного участка по затуханию с усилителем оптической мощности и оптическим предусилителем перед фотоприемником.....	57
Глава 3. Современные технологии строительства ВОЛС.....	60
3.1. Прокладка кабеля непосредственно в грунт	60
3.2. Организация переходов через различные преграды.....	64
3.3. Оптические кабели на «последней миле»	67
3.3. Воздушные способы строительства ВОЛС	71
3.4. Измерения параметров в процессе строительства ВОЛС и прямо-сдаточные испытания.....	82

Глава 4. Теоретические основы построения системы технической эксплуатации линейных сооружений связи	96
4.1. Принципы системного подхода к анализу СТЭЛСС	97
4.2. Критерии эффективности СТЭЛСС и моделирование процессов в системе	99
4.3. Основные задачи и параметры системы эксплуатации ЛСС	104
4.4. Эксплуатационные бригады – их формирование, квалификация и оснащение	114
Глава 5. Анализ повреждений магистралей, трактов первичной сети и разработка мероприятий по сокращению времени проведения ремонтно-восстановительных работ	119
5.1. Анализ причин повреждения КМ и основные параметры СТЭЛСС ..	119
5.2. Основные факторы воздействий на ВОЛС в процессе производства, строительства и эксплуатации	126
Глава 6. Основные направления оптимизации СТЭЛСС	135
6.1. Системы мониторинга ВОЛС	135
6.2. Технические мероприятия, направленные на повышение эффективности СТЭЛСС	147
6.3. Волоконно-оптические кабельные вставки для линейных трактов, организованных по металлическим кабелям	149
6.4. Принципы построения ЭОМ для аналоговых и цифровых систем передачи	150
6.5. Источники шумов в полупроводниковых лазерах	151
6.6. Ввод излучения в оптические волокна	156
6.7. Шумы оптических фотоприемников и их влияние на качество каналов составного тракта	158
6.8. Применение ЭОМ в составе цифровых линейных трактов	164
6.9. Другие варианты использования ЭОМ	165
6.10. Линейная часть ВОКВ для металлических линия связи	167
6.11. Волоконно-оптические кабельные вставки для ВОЛС	169
6.12. Монтажные и измерительные работы на ВОЛС в процессе строительства и эксплуатации	172
6.13. Контроль характеристик ВОКВ	174
Заключение	183
Принятые сокращения	185
Литература	187