



Ҳимоя қилишга рухсат берилсин

“ЭА ва Р” кафедра мудири

_____ **проф. Халиков А.А.**

« ____ » _____ **2018 й.**

**“Электр алоқа ва радио” кафедраси «Увеличения дальности
оптических систем передачи с использованием компенсаторов дисперсии.»**

_____ **мавзудаги**

МАЛАКАВИЙ БИТИРУВ ИШИ

Муаллиф: Ахмедова Н _____

Битирув иши раҳбари: Закиров В.М. _____

Меҳнатни муҳофаза қилиш бўйича маслаҳатчи:

Кат.ўқитувчи. КриворучкоБ.В. _____

Такризчи: _____

ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙУЛ МУХАНДИСЛАР ИНСТИТУТИ

Ташишни ташкил этиш ва транспорт логистикаси факультети
«Электр алоқа ва радио» кафедраси

Телекоммуникация йўналиши Ж-14 гуруҳ

“Тасдиқлайман”
«ЭА ва Р» кафедра мудири
Халиков А.А.

«10» 03 2018 й.

МАЛАКАВИЙ БИТИРУВ ИШИ БЎЙИЧА ТОПШИРИҚ

Талаба Ахмедова Ж.М.
(фамилия, исм, шарфи)

1. Битирув ишнинг мавзуси “Увеличение дальности передачи цифровых оптических систем передачи с использованием компенсаторов дисперсии”
«10» 12 2017 йил кафедра мажлисида макулланган.

2. Битирув ишни топшириш муддати 21.06.18.

3. Битирув ишни бажаришга доир бошланғич маълумотлар _____

4. Ҳисоблаш – тушунтириш ёзувларининг тартиби (ишлаб чиқиладиган массалалар рўйхати) = Введение

1. Оптические линии связи
2. Потери на волоконно-оптической линии связи
3. Расчет компенсаторов дисперсии
4. Оценка труда при эксплуатации ВОЛС

Чизма ишлар рўйхати (чизма номи аниқ кўрсатилади)

1. Структурная схема волоконно-оптической связи
2. Зависимость затухания оптического волокна от длины волны
3. Конструкция оптического волокна

6. Битирув иши бўйча маслаҳатчи(лар)

№ т/р	Бўлим мавзуси	Маслаҳатчи ўқитувчи Ф.И.Ш.	Имзо, сана	
			Топширик берилди	Топширик бажарилди
	Основная часть	Закиров В.М	10.03.18	Handwritten signature
	Охрана труда	Ибрагимов Б	Handwritten signature	Handwritten signature

7. Битирув ишни бажариш режаси

№ т/р	Битирув иши босқичларининг номи	Бажариш муддати (сана)	Текширувдан ўтганлик белгиси
1	Оптическия линия связи		Handwritten signature
2	Потери на волоконно-оптическую линию связи		Handwritten signature
3	Расчет коэффициентов дисперсии		Handwritten signature
4	Охрана труда		Handwritten signature

Битирув иши раҳбари

Закиров В.М

(фамилия, исм, шарфи)

Handwritten signature

Топшириқни бажаришга олдим

Алимова Н.М

(фамилия, исм, шарфи)

Handwritten signature

(имзо)

Топшириқ берилган сана 10.03.18

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ.....	9
1.1. Элементы оптических линий связи.....	11
1.2. Волоконно – оптические кабели.....	13
1.3. Оптические системы передач.....	23
1.4. Необходимость увеличения дальности передачи на оптических линиях связи.....	32
2. ПОТЕРИ НА ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ	34
2.1. Распространение световых волн по оптическим средам.....	34
2.2. Затухание оптических сигналов на линиях связи.....	39
2.3. Дисперсия оптических сигналов на линиях связи.....	44
3 РАСЧЕТ КОМПЕНСАТОРОВ ДИСПЕРСИИ.....	55
3.1. Методы увеличения дальности оптических систем передачи...	55
3.2. Расчет компенсаторов дисперсии.....	56
4. ОХРАНА ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛС.....	73
4.1. Опасные факторы присутствующие при эксплуатации ВОЛС..	74
4.2. Лазерная безопасность.....	74
4.2.1. Воздействие лазерного излучения на органы зрения.....	74
4.2.2. Технико-гигиеническая оценка лазерных изделий.....	75
4.2.3. Классы опасности лазерного излучения по СНиП 5804-91.....	76
4.2.4. Гигиеническое нормирование лазерного излучения.....	78
4.3. Требования безопасности при эксплуатации оборудования ВОЛС.....	79
4.3.1. Требования безопасности к устройству размещения оборудования ВОСП.....	79
4.3.2. Требования к размещению лазерных изделий.....	82

4.3.3.Классификация условий и характера труда.....	83
4.3.4.Требования безопасности при эксплуатации и обслуживании лазерных изделий.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	85
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	87

АННОТАЦИЯ

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрен вопрос увеличения дальности оптических систем передачи с использованием компенсаторов дисперсии.

Квалификационная работа состоит из четырех глав и заключение.

В первой главе подробно рассмотрены элементы волоконно-оптический линий связи. При этом особое внимание уделено к выбору расстояние между регенерационными пунктами и показатели, влияющие на их выбора. Показана необходимость увеличения расстояние между регенерационными пунктами.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы распространения оптического луча по волокну. При этом подробно рассмотрены причины потери оптического луча в среде, дисперсия, а также факторы, влияющие на распространение луча на оптической среде.

Третья глава посвящена к анализу методов увеличения дальности оптических систем передачи. На их основе предложен увеличения дальности передачи с использованием компенсаторов дисперсии. Произведен расчет компенсаторов дисперсии.

В четвертой главе рассмотрены вопросы техники безопасности и охраны труда

Работа выполнена в соответствии техническое задания в полном объеме и состоит из 81 стр, 18 рисунков, 10 таблиц и 8 наименований использованной литературы.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в Узбекистане осуществлены определенные меры для развития компьютеризации и информационно-коммуникационных технологий, в том числе и сетей телекоммуникации, которая является основой информационно-коммуникационных технологий. Создана законодательная база информатизации и телекоммуникаций, определяющая основные экономические, правовые и организационные основы функционирования информационно-коммуникационных технологий.

Современный информационно-коммуникационный мир развивается стремительно. Почти для каждого жителя нашей планеты стали вполне привычными такие термины, как Интернет, сеть передачи данных, глобальное информационное сообщество и т.д. Высокие технологии стали неотъемлемой частью человека, где бы он ни находился. Инфокоммуникационные технологии стали одним из важнейших факторов, влияющих на развитие общества и изменение образа жизни людей. Их применение позволяет более эффективно использовать достижения мировой науки, создает реальные возможности эффективного ведения бизнеса, обеспечивает информационное взаимодействие граждан, их доступ к отечественным и мировым информационным ресурсам и удовлетворение их социальных и личных потребностей в информационных продуктах и услугах. Процесс модернизации затрагивает все иерархические уровни единой сети электросвязи (ЕСЭ) – от доступа до международного. Наиболее сложные изменения происходят на уровне местных (городских и сельских) сетей. Поэтапное развитие и реконструкция телекоммуникационной сети АО “Ўзбекистон темир йўллари” на базе использования в качестве физической среды передачи оптических кабелей позволят плавно модернизировать сеть и расширить перечень предоставляемых услуг.

Увеличение дальности передачи цифровых оптических систем передачи с использованием компенсаторов дисперсии вызывают сегодня повышенный интерес, как со стороны телекоммуникационных операторов, так и их заказчиков. Такой интерес обусловлен увеличением влияния современных инфокоммуникационных технологий на повседневную жизнь человека и бизнес. Ведущие операторы телекоммуникации, следуя требованиям времени и возрастающим запросам потребителей услуг, уделяет большое внимание реконструкции и развитию телекоммуникационной инфраструктуры, с использованием современных информационно-коммуникационных технологий.

Одним из актуальных вопросов внедрения новых услуг сети является обеспечения требуемого качества обслуживания. Особенности данного вопроса заключается в том, что различные услуги, предоставляемые увеличение дальности передачи цифровых оптических систем передачи с использованием компенсаторов дисперсии, требуют различные уровни обслуживания. Для того, чтобы полностью реализовать преимущества NGN сетей необходимо разработать новые принципы распределения ресурсов сетей и управления трафиком, которые будут гарантировать различные уровни показателей качества обслуживания для большого и разнообразного числа приложений, реализуемых конечными пользователями. Эффективное и качественное услуги позволить расширить число предоставляемых услуг и её пользователей, получит доход с минимальными затратами.

1. ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Магистральные и внутризоновые телекоммуникационные сети, в настоящее время строятся главным образом на основе применения ОКей с ОМ оптическими волокнами. На местных сетях оптические кабели тоже все больше вытесняют электрические. Получила новую жизнь технология ВОЛП-ЛП, т.е. сооружение волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) путем подвески оптического кабеля на опорах линий электропередачи электрифицированных железных дорог. Простота, быстрота и экономность – вот основные достоинства этой технологии. Появилась новая технология – пневмопрокладки оптического кабеля в защитные пластмассовые трубы небольшого диаметра, которая применима не только для строительства городских сетей, но и перспективна при строительстве междугородных и международных линий связи. Эта технология позволяет облегчить и удлинить строительный сезон, увеличить скорость прокладки, эффективно решить многие вопросы эксплуатационно-восстановительных работ, особенно последующую модернизацию и развитие кабельной сети.

На сегодняшний момент определены технические требования, которым должны удовлетворять оптические кабели различных производителей при их постановках на взаимоувязанную сеть связи Республики.

В ближайшие десятилетия XXI века оптические кабели будут по-прежнему оставаться основным видом физической среды передачи стационарных телекоммуникационных сетей. Основное применение найдут оптические волокна стандартного и специализированного типов. Для обеспечения достаточной эквивалентной пропускной способности в течение всего срока службы должны использоваться многоволоконные ОК.

По назначению ОК достаточно классифицировать на две основные группы:

- линейные – для прокладки вне зданий (для наружной прокладки и эксплуатации);
- внутриобъектовые – для прокладки внутри зданий (для внутренней прокладки и эксплуатации).

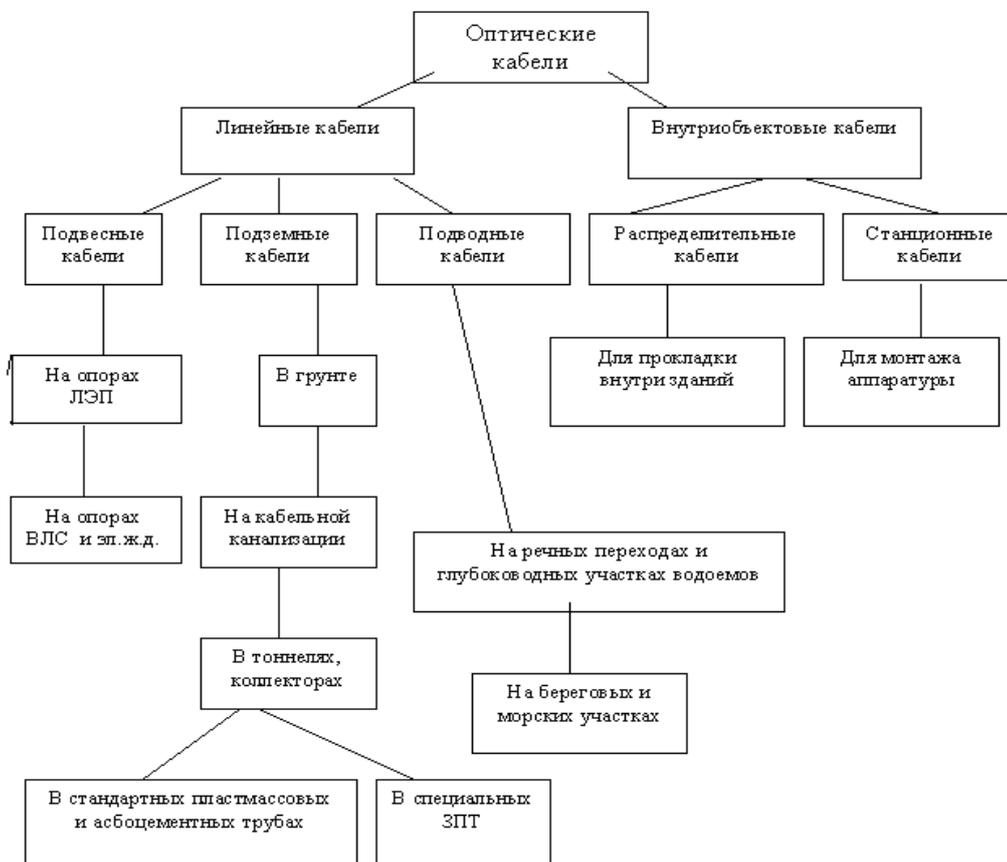


Рис.1.1 Классификация ОК

Нет необходимости классифицировать линейные ОК на магистральные, зоновые, городские и сельские, т.е. по принципу их принадлежности к магистральным, зоновым или местным сетям связи. Современные ОК оптические волокна (ОВ), выполняющие в ОК роль среды передачи, имеют малое затухание, слабую его частотную зависимость и не являются ограничивающим фактором применения линейных ОК на сетях связи (магистральной, зоновых или местных).

Определяющим фактором применения линейных ОК на сетях связи являются условия их прокладки и эксплуатации. Оптические кабели

позволяют создавать сети во всех средах: на суше, в воде и воздухе. С учетом этого линейные ОК можно классифицировать (рис.1.1) на три группы:

- подземные ОК;
- подвесные ОК;
- подводные ОК.

Внутриобъектовые ОК по условиям применения можно классифицировать на две группы:

- распределительные ОК;
- станционные (монтажные) ОК.

Условия прокладки и эксплуатации ОК в одной и той же среде далеко не одинаковы, поэтому целесообразно классифицировать ОК и по вариантам их применения.

1.1. Элементы оптических линий связи

В оптических системах передачи, как и в обычных системах передачи по электрическим кабелям, применяются частотный и временной методы разделения каналов. Дуплексная связь осуществляется по двум волоконным световодам, каждый из которых предназначен для передачи информации в одном направлении. Волоконно-оптические системы передачи информации на ж/д транспорте состоят из типового оборудования канало образования и группообразования, единого для всех цифровых систем, а также оборудования цифрового волоконно-оптического линейного тракта, обеспечивающего передачу цифровых сигналов от одной оконечной станции к другой. Структурная схема волоконно-оптической связи приведена на рис.1.2

Основными элементами схемы являются оптический кабель, а также оптический передатчик (ОПер), которые устанавливаются в начале тракта и

оптический приемник (ОПр), которые устанавливаются в конце тракта. Передатчик выполняет роль преобразователя электрического сигнала в оптический (ЭОП),

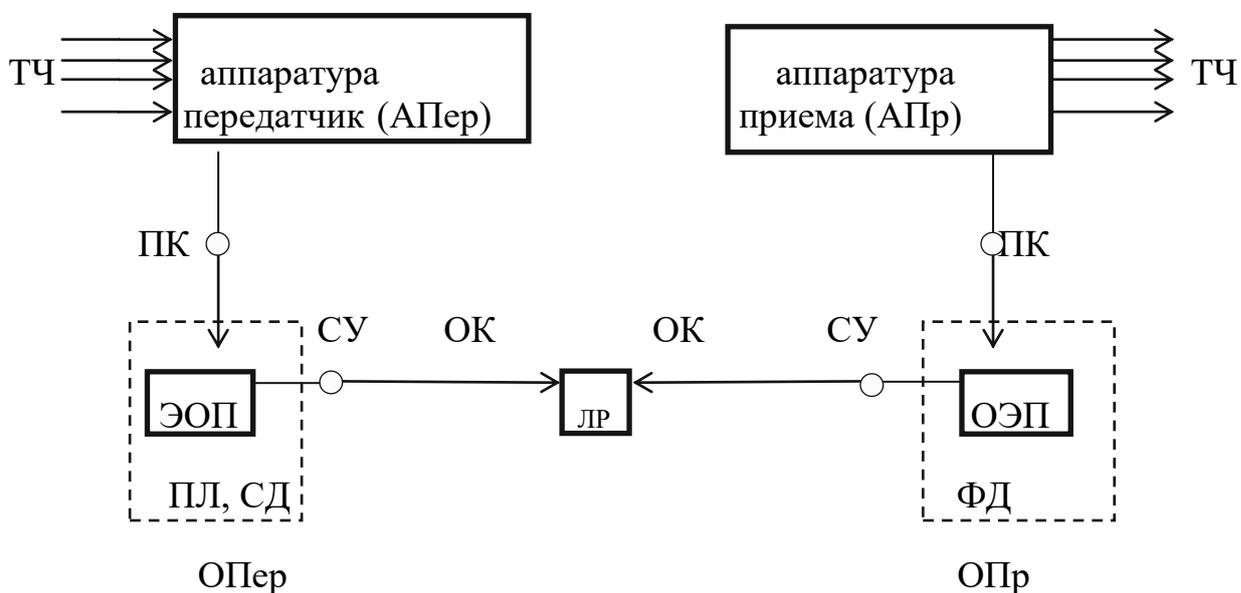


Рис.1.2. Структурная схема волоконно-оптической связи

а приемник обеспечивает обратное преобразование оптического сигнала в электрический (ОЭП). В качестве ЭОП наибольшее применение получили полупроводниковый лазер (ПЛ) и светоизлучающий диод (СД), а в качестве ОЭП - фотодиод (ФД).

Для преобразования кода и согласования элементов схемы используются кодирующие и согласовывающие оптические устройства (СУ). Преобразователь кода (ПК) формирует требуемую последовательность импульсов и осуществляет согласование уровней по мощности между электрическими (АПер и АПр) и оптическими (СД и ФД) элементами схемы. Передающие и приемные согласовывающие устройства формируют и согласовывают диаграммы направленности и апертуру между приемно-передающими устройствами и кабелем.

Передаваемый сигнал через ПК поступает в ЭОП, где он модулирует оптическую несущую, создаваемую ПЛ или СД, и через передающее СУ поступает в оптический кабель. На приеме оптический сигнал через приемное СУ поступает в фотодиод, где преобразуется в электрический сигнал, усиливается и через ПК поступает в приемник аппаратуры АПр.

Таким образом, на передающей стороне от аппаратуры АПердо ЭОП, а также на приемной стороне от ОЭП до аппаратуры АПр проходит электрический сигнал, а от ЭОП до ОЭП по оптическому кабелю — оптический сигнал.

В реальных условиях оказалось весьма целесообразным все элементы оптического передатчика и приемника изготавливать в виде компактного устройства — оптоэлектронного модуля: ПОМ—на передаче и ПРОМ на приеме.

Через определенные расстояния (30... 100 км), обусловленные величиной затухания кабеля вдоль оптической линии, располагаются линейные регенераторы (ЛР), где сигнал восстанавливается и усиливается до требуемой величины.

1.2. Волоконно – оптические кабели

В ОК, представляющие собой сложную оптико-физическую систему, в качестве направляющей среды передачи применяется кварцевое оптическое волокно (ОВ). Специфичность оптического волокна заключается не только в особенностях распространения по нему информационных сигналов, но и в конструкции самого ОВ, критичности ОВ к механическим нагрузкам (условия растяжения и сдавливания, изгибы, кручение и удары), чувствительности ОВ к таким факторам, как перепады температур, химическое воздействие, влияние влаги и водорода. Параметры эластичности и механизмы отказа у ОВ другие, чем у медных жил электрических кабелей. По существу воздействующие факторы и определяют особенности конструкций ОК различного назначения и использование в них

конструктивных элементов, обеспечивающих прокладку и эксплуатацию ОК в заданных интервалах воздействия внешних факторов.

Основные конструктивные элементы ОК:

- оптическое волокно;
- оптические модули;
- оптические сердечники;
- силовые элементы;
- гидрофобные материалы;
- броня;
- оболочка.

Отдельные элементы могут отсутствовать исходя из назначения и условий применения ОК.

Оптическое волокно (ОВ) – это основной конструктивный элемент ОК, выполняющий роль направляющей среды передачи.

Оптический модуль (ОМ) – самостоятельный конструктивный элемент оптического кабеля, содержащий одно и более ОВ, выполняет функции защитного элемента, уменьшает опасность обрыва ОВ и обеспечивает стабильность его работы при воздействии продольных и поперечных сил.

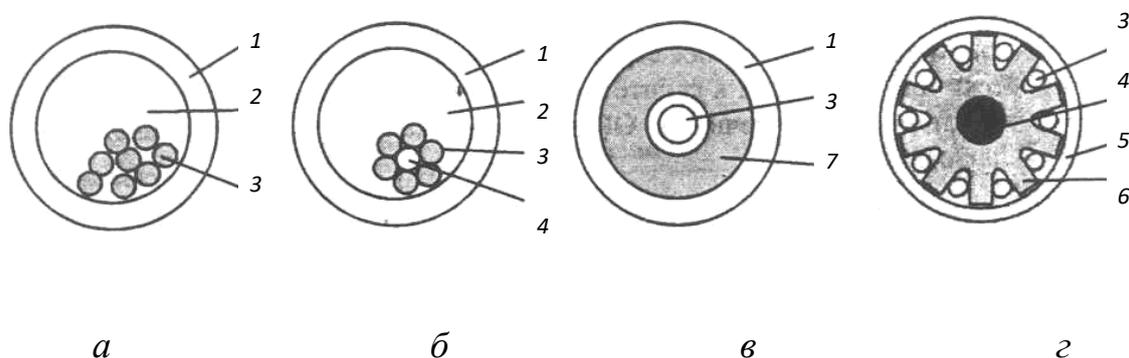
ОМ могут быть следующих типов:

- трубчатые;
- профилированные;
- ленточные.

В трубчатом ОМ оптические волокна могут либо свободно укладываться без скрутки (рис. 1.2,*а*) или путем скрутки вокруг центрального силового элемента (рис. 1.2*б*), либо размещаться в плотном буферном покрытии (рис. 1.2, *в*). Плотный буферный слой увеличивает сопротивляемость ОВ к сжатию и изгибам.

В профилированном ОМ в спиралеобразных пазах V-образного типа, образуемых в полимерном стержне, ОВ (одно или несколько) свободно

укладывается по спирали. Силовой элемент в центре профилированного стержня обеспечивает необходимые механические параметры и стойкость к температурным изменениям (рис. 1.2, з)



1 – трубка; 2 – воздух или гидрофобный компаунд; 3 – ОВ в защитном покрытии;

4 – ЦСЭ; 5 – лента; 6 – стержень профилированного типа со спиралеобразными V-образными пазами; 7 – плотный буферный слой

Рис. 1.2

В ленточном оптическом модуле оптические волокна от двух и более размещаются в линейный ряд, образуя линейный элемент. Фиксация ОВ в линейном элементе может осуществляться с помощью полимерного материала по длине элемента, выполняющего функцию вторичного защитного покрытия (рис. 1.3, а), или адгезивного слоя и наложенных поверх синтетических лент (рис. 1.3, б).

Из оптических модулей ленточного типа может создаваться матрица (единичный блок) с определенным числом ОВ, который затем размещается либо в полимерной трубке, либо в пазах спиралеобразного профилированного элемента (стержня).

Оптический сердечник ОК формируется либо из одного ОМ, расположенного, как правило, в центре, либо из нескольких ОМ или пучков ОМ, скрученных вокруг центрального силового элемента (ЦСЭ).

В первом случае оптический сердечник следует рассматривать как одномодульную конструкцию, во втором – многомодульную.

Оптический сердечник повышает механическую прочность ОК, защищает ОВ от изгибов и от нагрузок на растяжение и сдвливание в пределах, не оказывающих влияния на передаточные параметры. Центральный силовой элемент выполняет основную функциональную нагрузку.

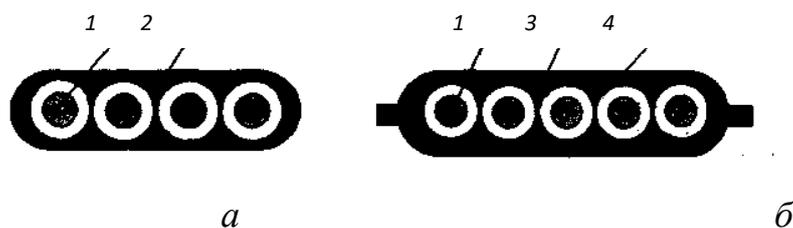


Рис. 1.3

Оптические сердечники могут содержать дополнительные элементы: элементы заполнения, не содержащие ОВ (кордели), медные жилы, пары или четверки из медных жил. Обычно повив оптического сердечника из элементов скрепляется нитями или скрепляющей лентой. Конструкция оптического сердечника (емкость, тип ОМ и его место в сердечнике, медные жилы, пары и четверки из медных жил, элементы заполнения) определяется функциональным назначением и условиями применения ОК.

Примеры конструкций оптических сердечников ОК, образованных из ОМ различного типа, для подвески или прокладки в грунте и внутри зданий приведены на рис. 1.4.

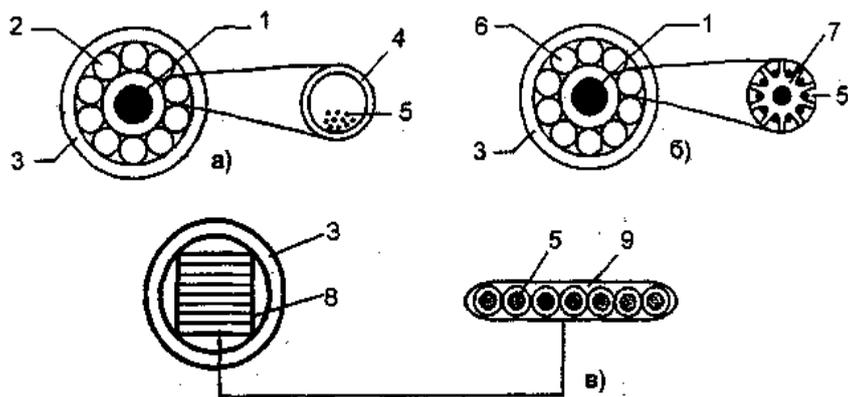


Рис.1.4

Силовые элементы обеспечивают требуемую механическую прочность ОК и величину деформации ОВ в заданных пределах. В качестве материалов для силовых элементов могут применяться стальная, медная и алюминиевая проволоки, а также арамидные нити и стеклопластиковые стержни. Силовые элементы размещенные в центре, обеспечивают большую гибкость, а на периферии – большую стойкость ОК к ударам и растягивающим нагрузкам.

Гидрофобные материалы препятствуют проникновению влаги в ОК, увеличивая срок службы ОВ. Как правило, это специальный и гидрофобный компаунд, водо блокирующая лента (разбухающая при попадании воды) или их комбинации. Свободное пространство в модулях, пазах, а также между оптическими моделями и силовыми элементами заполняется гидрофобным компаундом.

Оболочки ОК защищают оптические сердечники ОК от внешних воздействий и механических повреждений. Тип оболочки выбирают с учетом механической стойкости (к изгибам, кручению, поперечному сжатию, продольному растяжению и др.), стойкости к воздействию окружающей среды (климатическим и химическим воздействиям, нераспространению горения, выделению водорода и др.), физических характеристик материала (диаметр, масса и др.), а также удобства монтажа. Броня повышает механические свойства и улучшает защитные функции ОК.

Наиболее часто она выполняется из круглых проволок, оцинкованных или из нержавеющей стали, в виде одного или нескольких повивав. Например, в ОК для прокладки через судоходные реки, как правило, используется броня из двух повивав, тоже для шельфовых и прибрежных морских ОК, но только из проволок большого диаметра с более высокой прочностью. Применяется также броня из продольно наложенной стальной гофрированной ленты (для защиты от грызунов). В диэлектрических ОК броня может быть выполнена из арамидных нитей, стеклопластиковых стержней и др.

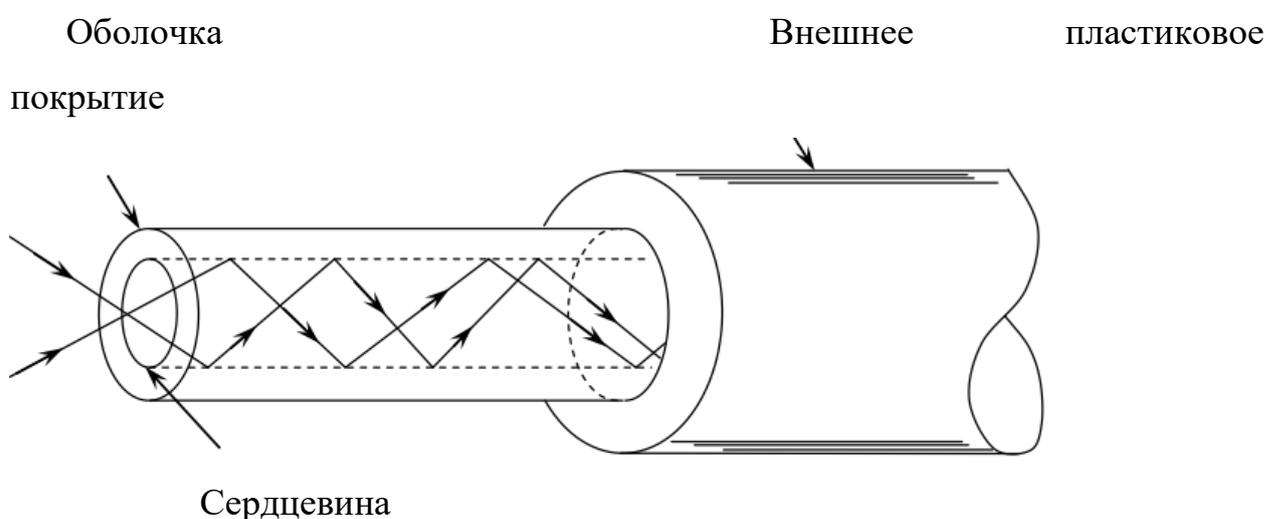


Рис.1.5 Конструкция оптического волокна

Любые дополнительные покрытия (оболочки) являются защитными. На рис. 1.5 показано внешнее пластиковое покрытие.

В зависимости от отношения диаметра сердцевинны ОВ к длине волны оптического излучения ОВ делятся на одномодовые (ОМ) и многомодовые (ММ). Обычно в ОМ волокне диаметр сердцевинны составляет 7-10 мкм, а в ММ волокне 50-62,5 мкм. В обоих типах диаметр оболочки составляет 125 мкм. На практике есть и другие значения диаметров ОМ (ОМ) ОВ и ММ (ММ) ОВ. По ОМ ОВ передается только одна основная HE_{11} мода.

ОМ волокно. Потребность в увеличении полосы пропускания и дальности передачи сигнала привела к необходимости создания ОМ оптического волокна, диаметр сердцевины и соотношение показателей преломления сердцевины и оболочки которого выбраны таким образом, что в нем может распространяться только одна мода (строго говоря, две моды с взаимно ортогональными состояниями поляризации).

ОМ волокна можно классифицировать по такому критерию, как хроматическая дисперсия. В рекомендациях МСЭ-Т регламентированы параметры этих типов волокон.

ОМ волокно с дисперсией, оптимизированной для использования на длине волны 1310 нм. Это исторически первое и наиболее широко распространенное волокно, производство которого осуществляется с 1983 года для магистральных и внутризоновых сетей связи.

Стандартное ОМ волокно, предназначенное для работы в двух рабочих диапазонах длин волн – 1285...1330 нм и 1530...1565 нм. Его затухание на длине волны 1550 нм очень мало (0,2 дБ/км), а дисперсия на этой длине волны составляет 18...20 пс/нм·км.

А по ММ ОВ возможна передача нескольких мод вводимое в оптическое волокно под различными углами в пределах числовой апертуры. Все допустимые моды имеют различные пути распространения и времени.

По показателю преломления n ММ ОВ делятся на ступенчатые и градиентные ОВ [1].

В ММ волокне со ступенчатым профилем показателя преломления распространяется одновременно большое число мод – лучей, введенных в волокно под разными углами. Основным недостатком такого волокна является наличие *межмодовой дисперсии*, возникающей из-за того, что разные моды проделывают в волокне разный оптический путь.

В ММ волокне с градиентным профилем показателя преломления значение показателя преломления сердцевины плавно изменяется от центра к

краям. Моды в волокне распространяются по параболическим траекториям, и разность их путей, а следовательно, и межмодовая дисперсия существенно меньше, чем в ММ волокне со ступенчатым профилем показателя преломления.

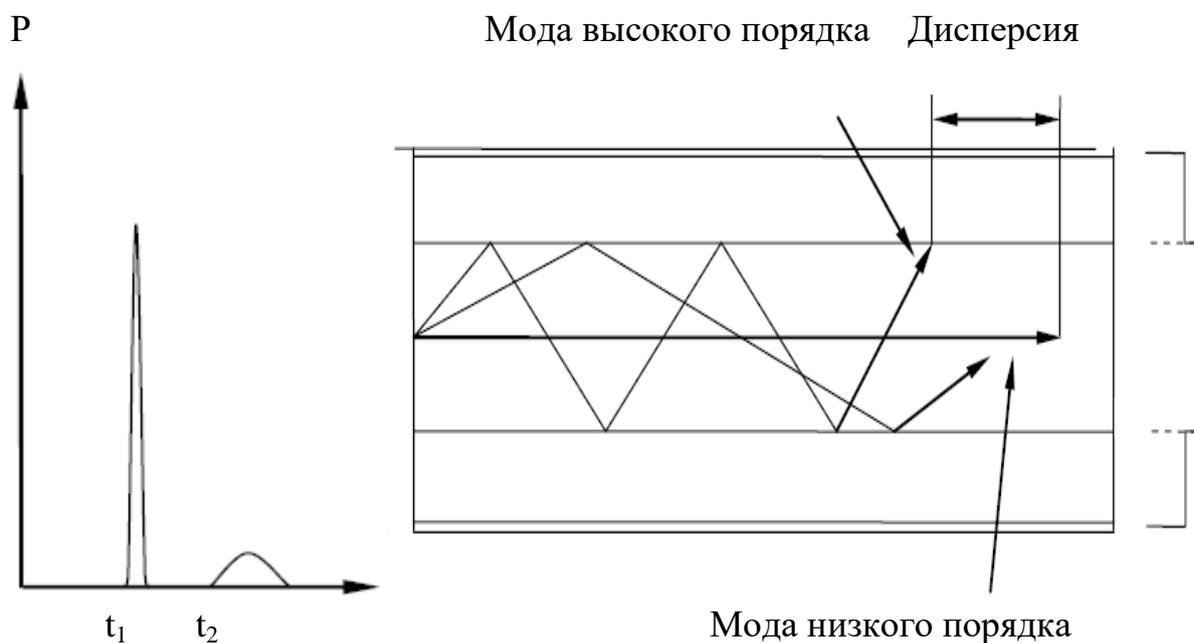
Принципиально новой модификацией этого типа ОВ являются волокна с отсутствием гидроксильного пика: на длине волны 1383 нм коэффициент затухания равен 0,31 дБ/км, стабильность затухания сохраняется даже после испытаний на водородное старение. Эти волокна (марка AllWave фирмы OFS, марка SMF28e фирмы Corning) позволяют увеличить почти на 100 нм рабочий диапазон длин волн по сравнению со стандартным ОВ, открывая пятое окно прозрачности 1360...1460 нм, и могут обеспечить многоканальную передачу без компенсации дисперсии в городских и внутризональных сетях. Преимуществом использования волокон этого типа по сравнению со стандартным ОВ является возможность реализовать 16 недорогих CWDM каналов в диапазоне 1260...1625 нм вместо 12. Волокна существуют, полностью совместимы со стандартными ОВ и имеющимся оборудованием и могут заменить стандартные ОВ в системах связи.

ОМ волокно со смещенной в область 1550 нм длиной волны нулевой дисперсии. Имеет область минимума оптических потерь, совпадающую с областью минимальной хроматической дисперсии. Волокно этого типа хорошо совместимо с оптическими усилителями, поскольку интервал длин волн, в котором волокно имеет наилучшие параметры по затуханию и дисперсии, совпадает с полосой максимального усиления оптических усилителей на эрбиевом волокне.

ОМ волокно с ненулевой дисперсией, смещенной в область длин волн 1550 нм. Необходимость разработки этого типа ОВ была связана с внедрением эрбиевых оптических усилителей в линиях связи и развитием оптических систем со спектральным уплотнением каналов, что значительно снизило себестоимость каналов. Однако способность эрбиевых оптических усилителей одновременно усиливать уплотненные сигналы в

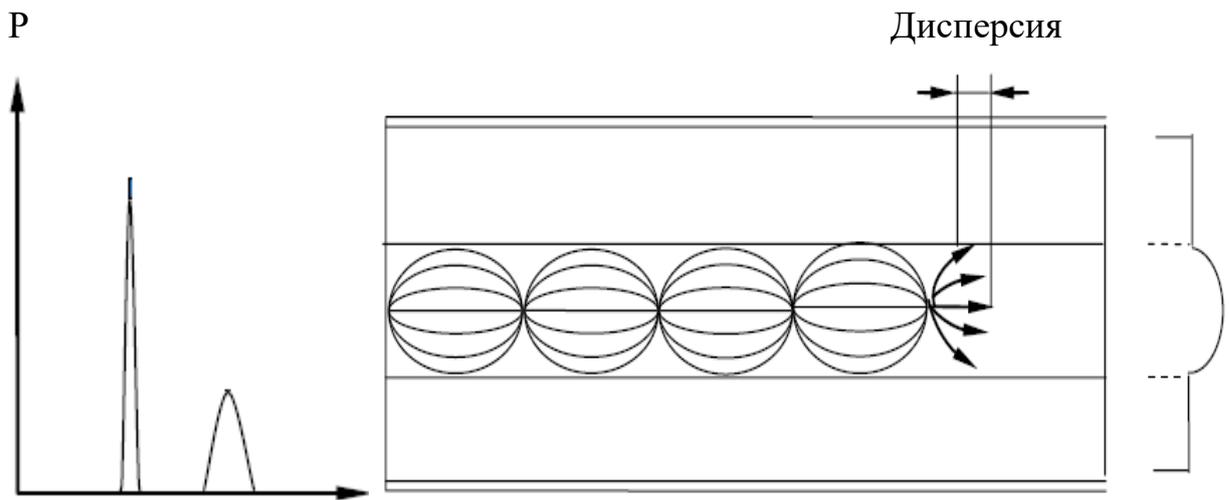
диапазоне 1550 нм, высокий уровень мощность сигнала (100 мВт и более) и большие регенерационные участки (120 км и более) привели к возникновению нелинейных оптических эффектов в кварцевом волокне. Нелинейное взаимодействие вызывает искажение сигнала и накапливается вдоль всей длины регенерационного участка.

ОМ волокно с контролируемой величиной, отличной от нуля хроматической дисперсии, находящейся в пределах 0,1...6,0 пс/нм·км в области спектра оптического усилителя (1530...1565 нм). Оно было разработано для уменьшения четырехволнового смешивания – эффекта, наиболее опасного для систем передачи со спектральным уплотнением при равномерно разнесенных по частоте каналах. Низкий наклон дисперсионной кривой и малое затухание обеспечивают использование этого волокна в расширенном диапазоне 1530...1625 нм.



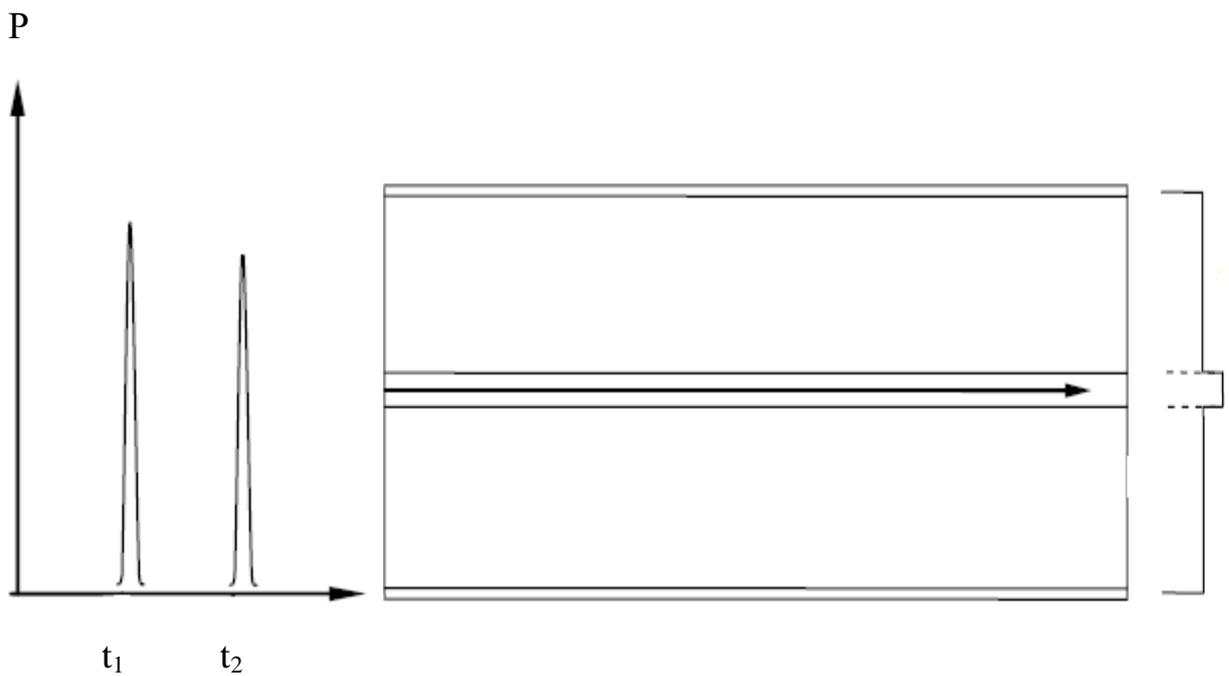
t_1 – входной импульс

t_2 – выходной импульс



t_1 – входной импульс

t_2 – выходной импульс



t_1 – входной импульс

t_2 – выходной импульс

а) ММ ступенчатое волокно, б) ММ градиентное волокно, в) ОМ ступенчатое волокно

Рис.1.6 Распространение оптического излучения по разным типам волокон:

Структура волокна такова, что величина его дисперсии достаточно велика, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, но мала, чтобы обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с на большие расстояния без компенсации дисперсии.

1.3. Оптические системы передачи

Для организации связи по оптическим кабелям используется аппаратура уплотнения PDH и SDH- системы, а также DWDM технологии. Эти системы используют различные методы модуляции, таких как импульсно-кодовая модуляция (ИКМ), дельта модуляция. Но наибольшее распространение получила цифровая система с временным разделением каналов и импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), использующая модуляцию интенсивности излучения источника.

Известны такие PDH системы E1 (ИКМ-30) , E2 (ИКМ-120), E3 (ИКМ-480), E4 (ИКМ-1920). Эти системы являются асинхронными системами, так как не используют внешнюю синхронизацию от центрального опорного источника. В них потеря бит (или невозможность их точной локализации) приводили не только к потере информации, но и к нарушению синхронизации. На принимающем конце сети было проще выбросить неверно полученные фреймы, чем инициализировать восстановление синхронизации с повторной передачей потерянного фрагмента, как это делается, например, в локальных сетях. Это значит, что указанная информация будет потеряна безвозвратно.

В отличие от PDH SDH системы обладает некоторыми отличительными свойствами:

Первая особенность иерархии SDH- поддержка в качестве входных сигналов каналов доступа только трибов PDH и SDH.

Другая особенность - процедура формирования структуры фрейма.

Два правила относятся к разряду общих; при наличии иерархии структур структура верхнего уровня может строиться из структур нижнего уровня, несколько структур того же уровня, могут быть объединены в одну более общую структуру. Остальные правила отражают специфику технологии. Например, на входе мультиплексора доступа имеем трибы PDH, которые должны быть упакованы в оболочку фрейма так, чтобы их легко можно было ввести и вывести в нужном месте с помощью мультиплексора ввода-вывода. Для этого сам фрейм достаточно представить в виде некоторого контейнера стандартного размера (в силу синхронности сети его размеры не должны меняться), имеющего сопровождающую документацию - заголовок, где собраны все необходимые для управления и маршрутизации контейнера поля-параметры, и внутреннюю емкость для размещения полезной нагрузки, где должны располагаться однотипные контейнеры меньшего размера (нижних уровней), которые также должны иметь некий заголовок и полезную нагрузку и т. д. по принципу матрешки, или по методу последовательных вложений, или инкапсуляций.

Для реализации этого метода было предложено использовать понятие контейнер, в который и упаковывается триб. По типоразмеру контейнеры делятся на 4 уровня, соответствующие уровням PDH. На контейнер должен клеиваться ярлык, содержащий управляющую информацию для сбора статистики прохождения контейнера. Контейнер с таким ярлыком используется для переноса информации, т.е. является логическим, а не физическим объектом, поэтому его называют виртуальным контейнером.

Вторая особенность иерархии SDH- трибы должны быть упакованы в стандартные помеченные контейнеры, размеры которых переделаются уровнем триба в иерархии PDH.

Виртуальные контейнеры могут объединяться в группы двумя различными способами. Контейнеры нижних уровней могут, например, мультиплексироваться (т. е. составляться вместе) и использоваться в качестве полезной нагрузки контейнеров верхних уровней (т.е. большего размера),

которые, в свою очередь, служат полезной нагрузкой контейнера самого верхнего уровня (самого большого размера) - фрейма STM-1.

Такое группирование может осуществляться по жесткой синхронной схеме, при которой место отдельного контейнера в поле для размещения нагрузки строго фиксировано. С другой стороны, из нескольких фреймов могут быть составлены новые (более крупные) образования мультифреймы.

Третья особенность иерархии SDH- положение виртуального контейнера может определяться с помощью указателей, позволяющих устранить противоречие между фактом синхронности обработки и возможным изменением положения контейнера внутри поля полезной нагрузки.

Хотя размеры контейнеров различны и емкость контейнеров верхних уровней достаточно велика, может оказаться так, что либо она все равно недостаточна, либо под нагрузку лучше выделить несколько (в том числе и с дробной частью) контейнеров меньшего размера. Для этого в SDHтехнологии предусмотрена возможность сцепления или конкатенации контейнеров (составление нескольких контейнеров вместе в одну структуру, называемую связистами "сцепкой"). Составной контейнер отличается соответствующим индексом от основного и рассматривается (с точки зрения размещения нагрузки) как один большой контейнер. Указанная возможность позволяет с одной стороны оптимизировать использование имеющейся номенклатуры контейнеров, с другой стороны позволяет легко приспособить технологию к новым типам нагрузок, не известных на момент ее разработки.

Четвертая особенность иерархии SDH- несколько контейнеров одного уровня могут быть сцеплены вместе и рассматриваться как один непрерывный контейнер, используемый для размещения нестандартной полезной нагрузки.

Пятая особенность иерархии SDHсостоит в том, что в ней предусмотрено формирование отдельного (нормального для технологий пакетной обработки в локальных сетях) поля заголовков размером $9 \times 9 = 81$ байт. Хотя перегруженность общим заголовком невелика и составляет всего

3.33%, он достаточно большой, чтобы разместить необходимую управляющую и контрольную информацию и отвести часть байт для организации необходимых внутренних (служебных) каналов передачи данных. Учитывая, что передача каждого байта в структуре фрейма эквивалентна потоку данных со скоростью 64 кбит/с.

Мультиплексор смонтирован на стойке и состоит из следующих основных блоков:

- четыре трибных интерфейсных блока TIU с 16 электрическими портами 2 Мбит/с для ввода-вывода до 63 входных потоков;

- двух (основного и резервного) менеджеров полезной нагрузки - устройств для формирования и управления полезной нагрузкой (различные типы полезной нагрузки в виде VC-n, TU-п, TUG-2, TUG-3 см. выше). Он, например, управляет операциями ввода/вывода каналов доступа (трибов), мультиплексированием и внутренней коммутацией потоков, производит сортировку (grooming) на уровне трибных блоков TU-n, формирует полезную нагрузку до уровня агрегатных блоков AU-ни и передает ее на интерфейсы агрегатных блоков;

- двух оптических или электрических агрегатных блоков AUA и B с выходными портами 155 Мбит/с (STM-1) "восток" и "запад" для формирования выходных потоков;

- двух (основного и резервного) блоков питания (на схеме не показаны);

- одного контроллера и локальной панели оператора (на схеме не показаны).

Основным функциональным модулем сетей SDH является мультиплексор. Мы будем использовать этот термин как для собственно мультиплексоров, служащих для сборки (мультиплексирования) высокоскоростного потока из низкоскоростных, так и для демультиплексоров, служащих для разборки (демультиплексирования) высокоскоростного потока с целью выделения низкоскоростных потоков.

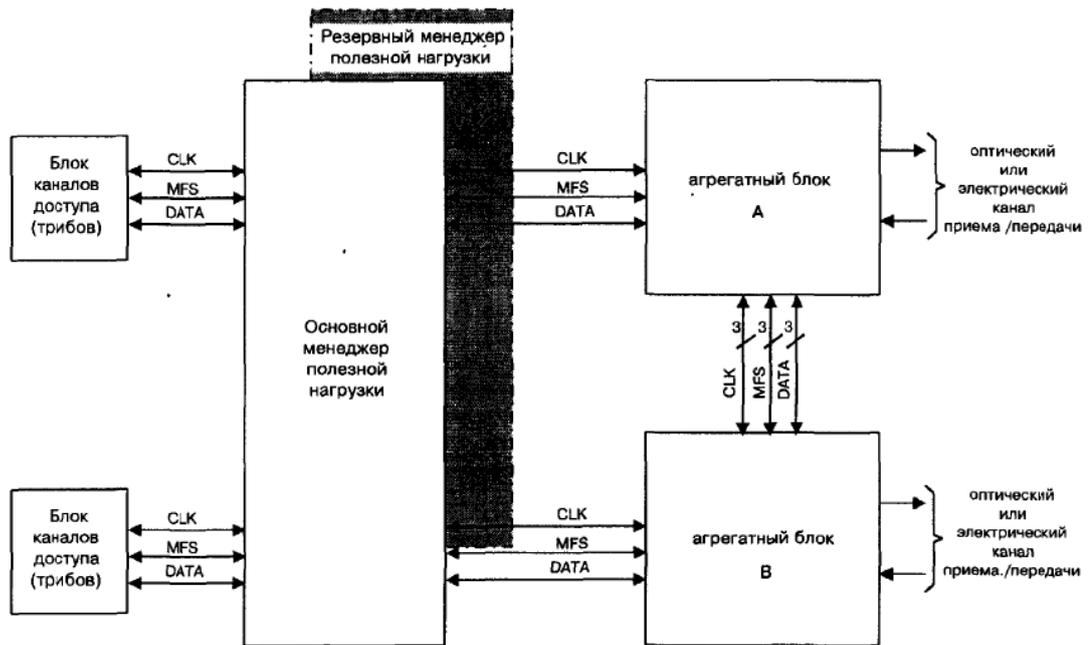


Рис.1.7 Структурная схема мультиплексора TN-IX компании Nortel(уровень STM-1)

Мультиплексоры SDH в отличие от обычных мультиплексоров, используемых, например, в сетях PDH, выполняют как функции собственно мультиплексора, так и функции устройств терминального доступа, позволяя подключать низкоскоростные каналы PDH иерархии непосредственно к своим входным портам. Они являются более универсальными и гибкими устройствами, позволяющими решать практически все перечисленные выше задачи, т.е. кроме задачи мультиплексирования выполнять еще и задачи коммутации, концентрации и регенерации. Это оказывается возможным в силу модульной конструкции SDH мультиплексора - SMUX, при которой выполняемые функции определяются лишь возможностями системы управления и составом модулей, включенных в спецификацию мультиплексора. Принято, однако, выделять два основных типа SDH мультиплексора: терминальный мультиплексор и мультиплексор ввода/вывода.

Терминальный мультиплексор ТМ является мультиплексором и оконечным устройством SDH сети с каналами доступа, соответствующими трибам PDH и SDH иерархий (рис.1.8). Терминальный мультиплексор может

или вводить каналы, т.е. коммутировать их со входа трибного интерфейса на линейный выход, или выводить каналы, т.е. коммутировать их с линейного входа на выход трибного интерфейса. Он может также осуществлять локальную коммутацию входа одного трибного интерфейса на выход другого трибного интерфейса. Как правило эта коммутация ограничена трибами 1.5 и 2 Мбит/с.

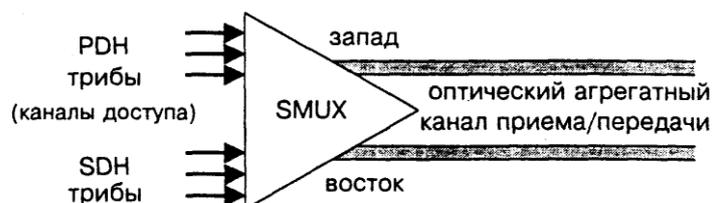


Рис.1.8. Синхронный мультиплексор (SMUX): терминальный мультиплексор (ТМ) или мультиплексор ввода/вывода (ADM)

Для мультиплексора максимального на данный момент действующего уровня SDH иерархии (STM-64), имеющего скорость выходного потока 10 Гбит/с, максимально полный набор каналов доступа может включать PDH трибы 1.5, 2, 6, 34, 45, 140 Мбит/с и SDH трибы 155, 622 и 2500 Мбит/с, соответствующие STM-1,4.. Если PDH трибы являются "электрическими", т.е. использующими электрический сигнал для передачи данных, то SDH трибы могут быть как электрическими (STM-1), так и оптическими (STM-1,4,16). Для мультиплексоров SDH уровня STM-16 из этого набора исключается триб 2500 Мбит/с, для уровня STM-4 из него исключается триб 622 Мбит/с, и, наконец, для первого уровня - триб 155 Мбит/с. Ясно, что конкретный мультиплексор может и не иметь полного набора трибов для использования в качестве каналов доступа. Это определяется не только пожеланиями заказчика, но и возможностями фирмы-изготовителя.

Другой важной особенностью SDH мультиплексора является наличие двух оптических линейных выходов (каналов приема/передачи), называемых

агрегатными выходами и используемых для создания режима стопроцентного резервирования, или защиты по схеме 1+1 с целью повышения надежности. Эти выходы могут называться основными и резервными или восточными и западными. Нужно заметить, что термины "восточный" и "западный", применительно к сетям SDH, используются достаточно широко для указания на два прямо противоположных пути распространения сигнала в кольцевой топологии: один - по кольцу влево - "западный", другой - по кольцу вправо - "восточный". Они не обязательно являются синонимами терминов "основной" и "резервный". Если резервирование не используется, достаточно только одного выхода. Резервирование 1+1 в сетях SDH является их внутренней особенностью и не имеет ничего общего с так называемым внешним резервированием, когда используется альтернативный путь от одного узла сети к другому, как это делается в так называемой ячеистой сети SDH, работающей в незащищенном режиме.

Мультиплексор ввода/вывода. Мультиплексор ввода/вывода ADM может иметь на входе тот же набор трибов, что и терминальный мультиплексор (рис.1-2). Он позволяет вводить/выводить соответствующие им каналы. Дополнительно к возможностям коммутации, обеспечиваемым TM, ADM позволяет осуществлять сквозную коммутацию выходных потоков в обоих направлениях (например, на уровне контейнеров VC-4 в потоках, поступающих с линейных или агрегатных выходов, т.е. оптических каналов приема/передачи), а также осуществлять замыкание канала приема на канал передачи на обеих сторонах ("восточной" и "западной") в случае выхода из строя одного из направлений. Наконец, он позволяет (в случае аварийного выхода из строя мультиплексора) пропускать основной оптический поток мимо него в обходном режиме. Все это дает возможность использовать ADM в топологиях типа кольца.

Концентраторы. Концентратор, представляет собой мультиплексор, объединяющий несколько, как правило однотипных потоков, поступающих

от удаленных узлов сети в один распределительный узел сети SDH, не обязательно также удаленный, но связанный с основной транспортной сетью.

Этот узел может также иметь не два, а три, четыре или больше линейных портов типа STM-N или STM-N-1 и позволяет организовать ответвление от основного потока или кольца, или, наоборот, подключение двух внешних ветвей к основному потоку или кольцу или, наконец, подключение нескольких узлов ячеистой сети к кольцу SDH. В общем случае он позволяет уменьшить общее число каналов, подключенных непосредственно к основной транспортной сети SDH. Мультиплексор распределительного узла в порте ответвления позволяет локально коммутировать подключенные к нему каналы, давая возможность удаленным узлам обмениваться через него между собой, не загружая трафик основной транспортной сети.

Регенераторы. Регенератор представляет собой вырожденный случай мультиплексора, имеющего один входной канал - как правило, оптический триб STM-N и один или два (при использовании схемы защиты 1+1) агрегатных выхода (рис.1.9).

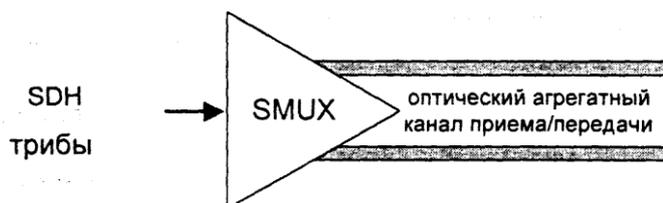


Рис.1.9. Мультиплексор в режиме регенератора

Он используется для увеличения допустимого расстояния между узлами сети SDH путем регенерации сигналов полезной нагрузки. Обычно это расстояние (учитывая практику использования одномодовых волоконно-оптических кабелей) составляет 15-40 км для длины волны порядка 1300 нм или 40-80 км - для 1500 нм, хотя при использовании оптических усилителей оно может достигать 120-150 км. Более точно это расстояние определяется

отношением допустимых для секции регенератора суммарных потерь к затуханию на 1 км длины кабеля.

Коммутаторы. Подавляющее большинство современных мультиплексов ввода/вывода строятся по модульному принципу. Среди этих модулей центральное место занимает кросс-коммутатор или просто коммутатор - DXC. В синхронной сети он позволяет установить связи между различными каналами, ассоциированными с определенными пользователями сети, путем организации полупостоянной (временной) перекрестной связи, или кросс-коммутации, между ними. Возможность такой связи позволяет осуществить маршрутизацию в сети SDH на уровне виртуальных контейнеров VC-n, управляемую сетевым менеджером (управляющей системой) в соответствии с заданной конфигурацией сети.

Физически возможности внутренней коммутации каналов заложены в самом мультиплексе SDH, что позволяет говорить о мультиплексе как о внутреннем или локальном коммутаторе. Кроме этого, мультиплексор, как правило, имеет возможность коммутировать собственные каналы доступа, что равносильно локальной коммутации каналов. На мультиплексы, например, можно возложить задачи локальной коммутации на уровне однотипных каналов доступа, т.е. задачи, решаемые концентраторами.

Все это говорит о возможности распределенного управления процессом коммутации в узлах сети SDH. Однако эти возможности в большинстве своем ограничены как по числу коммутируемых каналов, так и по типу виртуальных контейнеров VC, доступных для коммутации. Поэтому в общем случае приходится использовать специально разработанные синхронные коммутаторы - SDXC, осуществляющие не только локальную, но и общую или проходную (сквозную) коммутацию высокоскоростных потоков (34 Мбит/с и выше) и синхронных транспортных модулей STM-N. Важной особенностью таких коммутаторов является отсутствие блокировки других каналов при коммутации, когда коммутация одних групп TU не накладывает

ограничений на процесс обработки других групп ТУ. Такая коммутация называется не блокирующей.

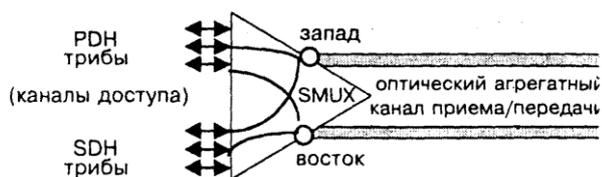


Рис.1.10. Мультиплексор ввода/вывода в режиме внутреннего коммутатора

1.4. Необходимость увеличения дальности передачи на оптических линиях связи

Известно, что выбор типа лазера оптических систем передачи или расстояние между усилительными или регенерационными пунктами выбирается на основе двух параметров:

- наибольшее усиление оптической систем передачи или энергетическим потенциалом;
- дисперсионным искажениям.

В качестве примера в табл. 1.1 приведены основные параметры аппаратуры оптической систем передачи аппаратуры фирмы NECSMS-600V.

Параметры лазера мультиплексора SMS-600V

Таблица 1.1

Параметры	Ед. Изм.	оптический интерфейс							
		STM-1				STM-4			
		I - 1	L- 1.1	L- 1.2	L- 1.2S	S- 4.1	L- 4.1	L-4.2	L- 4.2S
Оптическая мощность	dBm	-15	-5	-5	-5	-15	-3	- 3	- 2
Энергетический	dBm	8	29	29	35	8	29,5	29,5	34

потенциал Э									
Дисперсия	dB	1	1	1	1		1	1	1
Потери в коннекторах	dB	1	1	1	1	1	1	1	1
Затухания кабелеа	dB	6	25	25	31	6	25,5	25,5	30
Максимальная длина РУ по затуханию l_a	км	15	62	104	129	15	63	106	125
дисперсия кабелеа	нс/нм км	4	4	18	18	4	4	18	18
Максимальная длина РУ по дисперсии l_α	км	10	52	138	138	3	52	88	111

На основе этих двух параметров выбирается длина регенерационного участка.

Для примера рассмотрим лазер L-4.2S. Максимальная длина регенерационного участка по затуханию составляет 125 км, а по дисперсии 111 км. Поэтому выбираем расстояние регенерационного участка 111 км. Из таблицы видно, что максимальную длину регенерационного участка ограничивает затухания по дисперсии и разница по расстоянию составляет 14 км.

При выборе длину регенерационных участков l_{yy} используются неравенство

$$l_{yy} < l_a$$

$$l_{yy} < l_\alpha$$

На практике часто требуются выбирать длинные регенерационные участки с лазерами с наименьшим энергетическим потенциалом (не дорогим). Имеется несколько варианты решения данной задачи:

- уменьшить расстояние регенерационных участков или иными словами увеличить число регенерационных пунктов;
- выбрать более мощный лазер или мультиплексор;
- выбрать оптический кабель с низким коэффициентом затухания и дисперсия;
- использовать компенсаторов дисперсии.

Первый вариант приводит увеличения стоимости проекта, так как возникает необходимость выбрать место размещения регенерационного пункта, его строительство и эксплуатация. Не всегда удается решать эти вопросы. Второй вариант приводит кувеличения стоимости оборудования систем передачи.

В данной выпускной квалификационной работе предлагается решить данный вопрос с использование компенсаторов дисперсии.

2. ПОТЕРИ НА ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

2.1. Распространение световых волн по оптическим средам

При перемещении из одного материала в другой изменяется скоростьраспространения света, что с точки зрения волновой теории, приводит кизменению направления распространения. Отклонение света от прямогонаправления называется преломлением, которого можно проследить спомощью призмы (рис.2.1)

Полное внутреннее отражение. Физической основой передачи светового сигнала по световоду(оптоволокну) является явление полного внутреннего отражения (ПВО) светаот границы раздела двух сред с различными

показателями преломления. Для его реализации в оптическом волокне показатель преломления сердцевины n_c должен быть больше, чем показатель преломления оболочки $n_{об}$. Явление ПВО при этом наблюдается только для луча, падающего под углом, равным или большим критического угла падения (напомним, что это угол между падающим лучом и нормалью к поверхности в точке падения)

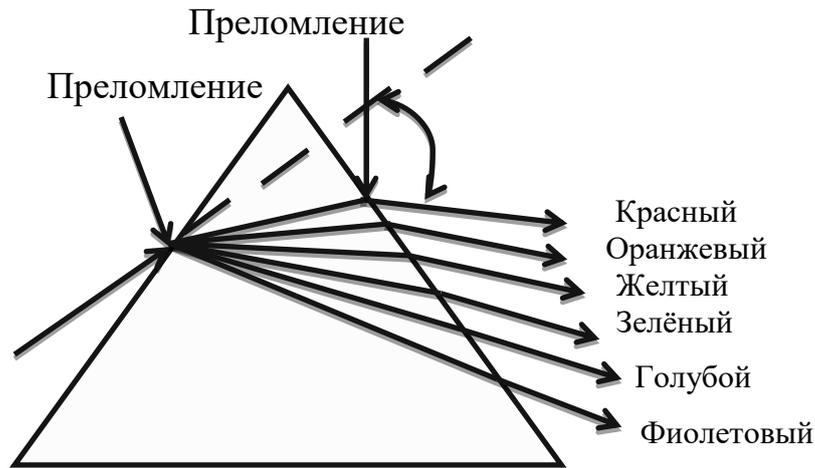


Рис.2.1 Преломление света на призме

При $\theta = \theta_{кр}$ преломленный луч скользит по границе раздела и как бы исчезает из рассмотрения. Свет падающий под углом больше критического угла $\theta > \theta_{кр}$ полностью внутреннеотражается от границ двух сред. Критический угол падения $\theta_{кр}$ может быть вычислен по закону Снеллиуса:

$$\theta_{кр} = \arcsin(n_{об}/n_c) \quad (2.1)$$

Например, если $n_1=1,48$, $n_2=1,46$:

$$\theta_{кр} = \arcsin\left(\frac{1,48}{1,46}\right) = \arcsin(0,9864) = 80,6^\circ \quad (2.2)$$

При таком критическом угле $\theta_{кр}=80,6^\circ$, если угол падения θ_2 больше критического угла $\theta_2=81^\circ$, то свет не проникая на вторую среду, распространяется вдоль сердцевины. Этот процесс представлен на рис. 2.2. Луч света падающий под углом больше критического угла $\theta > \theta_{кр}$ полностью внутреннее отражается от границы двух сред (свет 1). При этом $\theta_1 = \theta_2$ поэтому луч света 1 распространяется вдоль сердцевины зигзагообразно, претерпевая ряд отражений. В идеальном случае (приотсутствии рассеяния света и нулевой дисперсии) луч 1 мог бы распространяться внутри сердцевины с n_1 на сколь угодно большое расстояние.

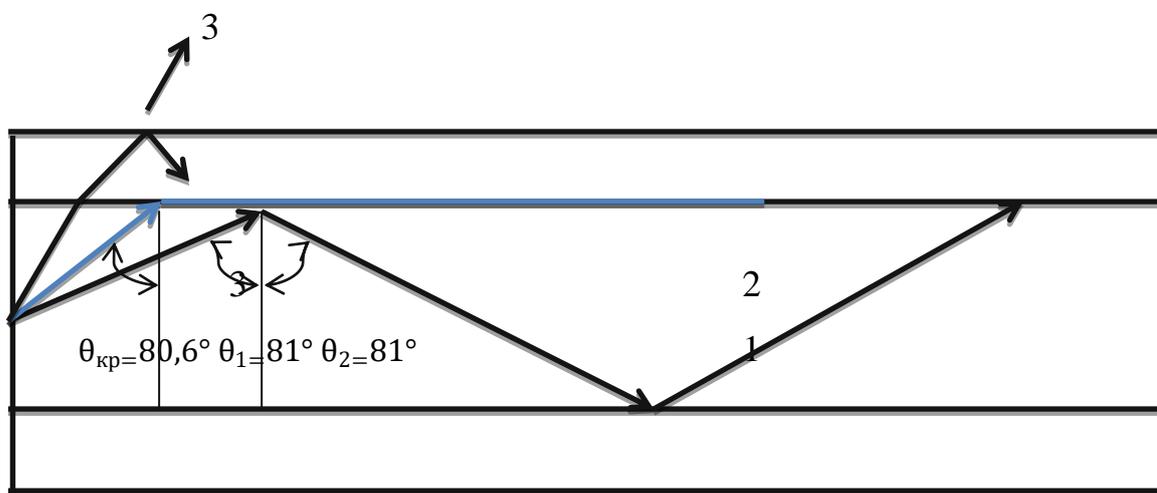


Рис. 2.2. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне

Луч света 1 называется направляющимися модами. Луч 2 падая под $\theta_{кр}$ углом, преломляется и распространяется по границе сердцевина/оболочка. Луч 3 падая под углом меньше критического угла $\theta < \theta_{кр}$ преломляется и падая на границу оболочки, отражается от границы раздела, в результате распространяется по оболочке или излучается во внешнее пространство. Они называются излучаемыми модами.

Числовая апертура. Световой луч вводится в ОВ, под каким - то углом. Максимальный угол падения луча в сердцевину волокна называется углом апертуры (θ_a). Для ПВО луч должен вводиться в волокно под углом апертуры. Синус угла апертуры называется числовой апертурой и

обозначается буквами NA (N number - число, A-aperture - отверстие).

Числовая апертура определяется по

следующей формуле:

$$NA_0 = \sin\theta_{кр} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1\sqrt{2\Delta_n}$$

или

$$NA_1 = k * \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

Здесь - в (2.3) приведены две формулы для вычисления NA, которые могут встретиться в литературе. Они дают близкие значения числовой апертуры. Первая формула используется для теоретических, а вторая - для практических расчетов, причем $k=0,98$ или $k=0,94$ в зависимости от методики измерений. Для данных, приведенных выше к рис.1.9 $n_1=1,48$, $n_2=1,46$, указанные формулы дают следующие значения числовой апертуры: 0,242487 (теоретическая) или 0,237637 ($k=0,98$) и 0,227938 ($k=0,94$) [1].

Относительная разность показателей преломления Δ_n равна:

$$\Delta_n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.4)$$

Лучи, которые попадают под углом $\leq a$, называются апертурными (на рис.2.3, им соответствуют луч 1). Они, испытывая ПВО, распространяются по волокну. Лучи, для которых $> a$ начинают распространяться по волокну, но постепенно затухают, так как при многократном отражении отдают часть энергии преломленному лучу, выходящему из сердцевины в оболочку.

Эти лучи называются внеапертурными и делятся на те, которые распространяются по оболочке, например, луч 2, и те, которые выходят за границы волокна, - луч 2¹ [1].

Числовая апертура характеризует собирающую способность волокна по отношению к входному излучению. В зависимости от типа волокна она

может меняться от 0,13 до 0,28.

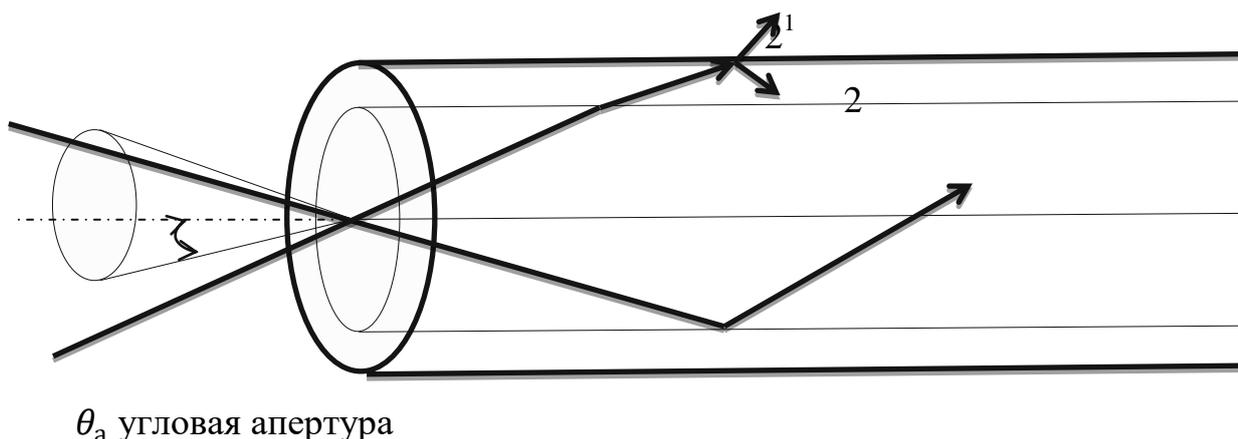


Рис.2.3 Угол апертуры ОВ

Типичные значения параметров самых распространенных ОВ приведены в таблице 2.1 [3]:

NA показывает ввод светового луча в ОВ и распространения излучения по ОВ. ОВ с большим значением NA хорошо принимает свет, а в ОВ с минимальным значением NA можно вводить пучок света только с узким направлением.

Типичные значения параметров самых распространенных ОВ Таблица 2.1

Тип ОВ	Диаметр сердцевины, мкм	NA	Максимальный угол падения в сердцевину волокна, град	Δ_n
ММ ОВ	50 – 200	0,25 – 0,5	20 – 30	0,005 – 0,02
ОМ ОВ	5 – 12	0,12 – 0,25	5 - 8	0,002 – 0,01

ОВ с большой полосой пропускания имеют минимальное значение NA. Таким образом, в них количество мод меньше, дисперсия минимальна и полоса пропускания широкая. В ОВ с большим NA из-за множество количества мод, высока межмодовая дисперсия [2].

2.2. Затухание оптических сигналов на линиях связи

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией.

При передаче оптического сигнала по волокну из-за линейных и нелинейных взаимовлияний световой волны со средой волокна уменьшается мощность сигнала и происходит его затухание. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в волокне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как: потери на поглощение; потери на рассеяние; кабельные потери.

Потери на поглощение и на рассеяние вместе называют собственными потерями, в то время как кабельные потери в силу их природы называют также дополнительными потерями, рис 2.3.

Полное затухание в волокне измеряется в дБ/км и определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_k, \text{ (дБ/км)} \quad (2.5)$$

Коэффициент затухания для данной длины волны оптического излучения определяется отношением оптической мощности вводимой в волокно к оптической мощности на выходе волокна.

Обычно оптическая мощность измеряется в децибелах и зависит от параметров волокна и от длины волны. Зависимость затухания от длины волны имеет нелинейный характер, эта зависимость была представлена на рис. 2.4. Для разных длин волн значения затухания приведены в таблице 2.3.

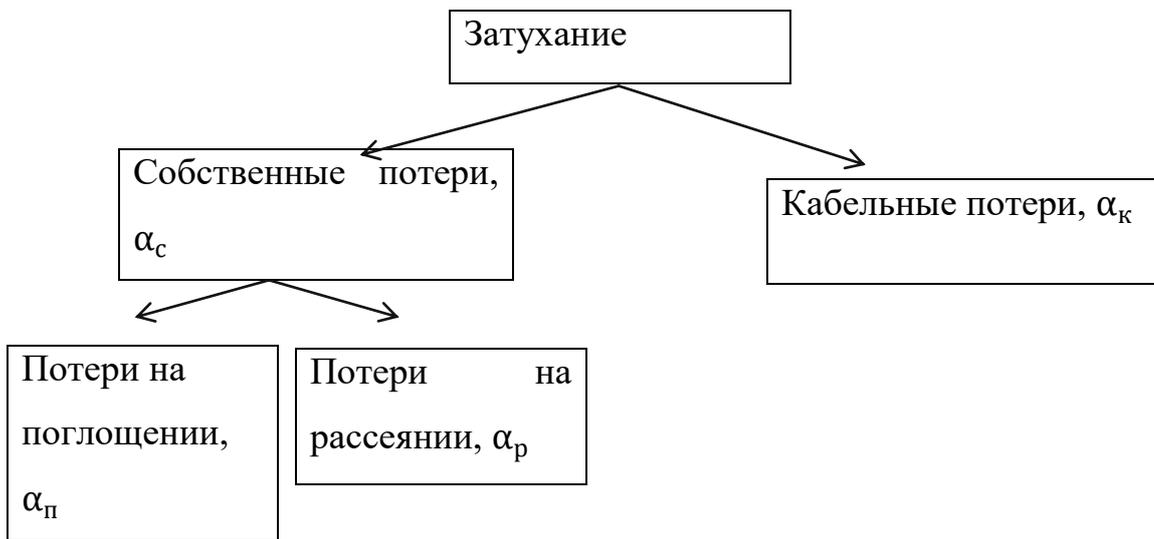


Рис. 2.4. Основные типы потерь в оптическом волокне

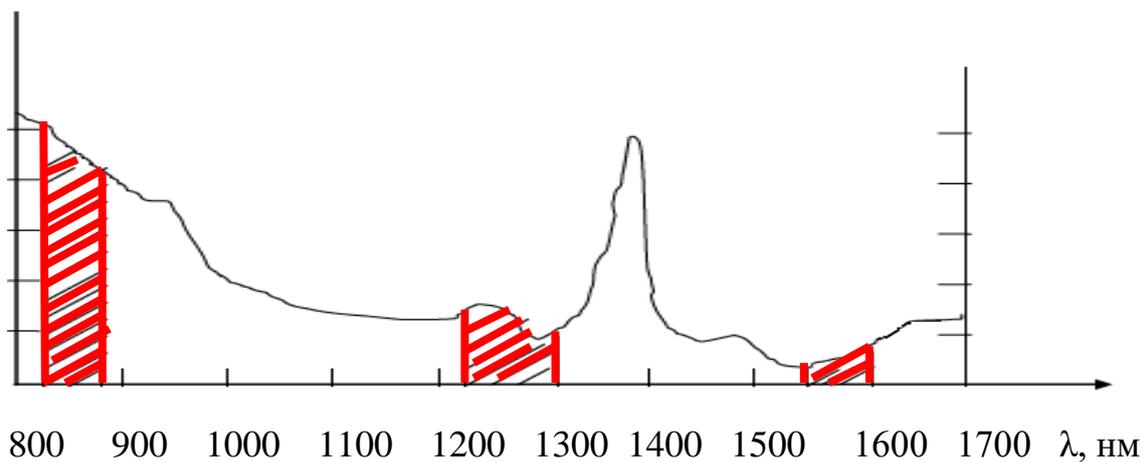


Рис. 2.5. Зависимость затухания оптического волокна от длины волны

Значения затухания для разных длин волн

Таблица 2.2

Окно прозрачности	Длина волны , мкм	Затухание , дБ/км
1	0,85	2-3
2	1,3	0,4-1,0
3	1,55	0,2-0,3

Первое окно прозрачности реализуемое с помощью широкополосных

источников излучения используется для передачи на близкие расстояния. Второе окно прозрачности реализуемое с помощью источников излучения с длина волн 1,28-1,33 мкм широко применяется для передачи на дальние расстояния. Это окно прозрачности имеет наиболее меньшее затухание. В этом диапазоне кварцевое стекло имеет минимальное значение хроматической дисперсии, что даёт использование дешёвых источников излучения. Третье окно прозрачности имеет диапазон 1,525-1,575 мкм, минимальный коэффициент затухания является преимуществом этого окна прозрачности. Но при передаче высокоскоростных потоков по этому окну прозрачности увеличивается значение дисперсии. Для уменьшения дисперсии требуется использование компенсирующих устройств, что увеличивает стоимость волоконно-оптических систем связи [4].

Собственные потери оптического волокна, как уже отмечено, состоят из двух составляющих: из потерь на поглощение и на рассеяние оптического излучения.

Потери на поглощение α_p состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулевого тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков потерь.

Собственные потери на поглощение растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением.

Потери на рассеянии α_r . Уже к 1970 году изготавливаемые оптические волокна становятся настолько чистыми, что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800

нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света.

Рэлеевское рассеяние вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях (рис. 2.5). В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна.

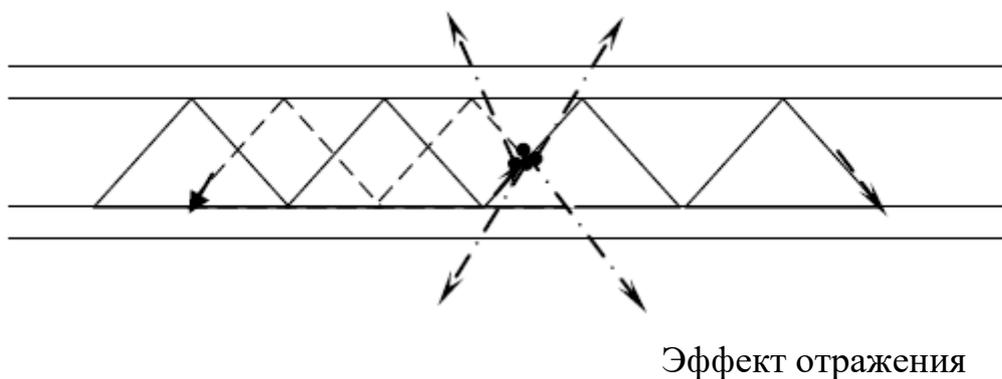


Рис. 2.6. Рассеивание и отражение света в оптическом волокне

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями, возникающими из-за рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

На рис.2.4 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм, и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для оптических волокон.

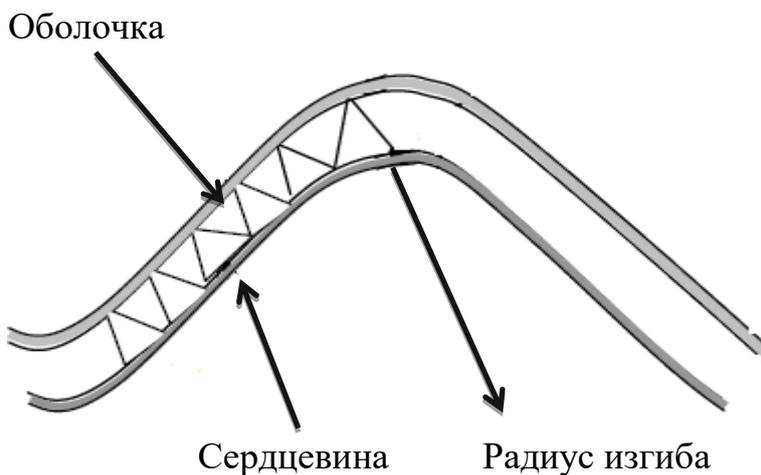
Кабельные потери возникают из-за микро и макроизгибов.

Микроизгибы. Микроизгиб это микроскопическое изменение геометрии сердцевинки волокна при производстве, то есть несовершенство волокна.

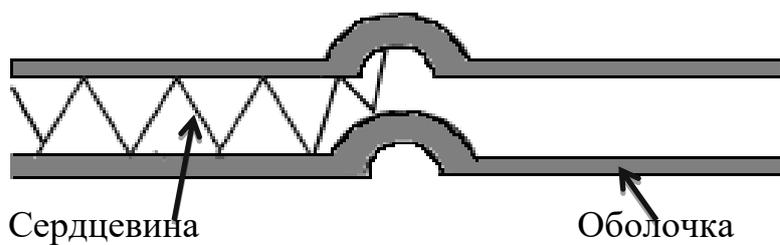
Микроизгибы возникают при производстве расположением сердцевинки не по оси, из-за покрытия негладкими внешними покрытиями. Микроизгибы увеличивают кабельные потери. Эти потери могут быть очень высокими и в некоторых случаях могут даже превышать 100 дБ/км. Один из видов микроизгиба представлен на рис.2.6,б.

Макроизгибы. Макроизгибом называется изгибы превышающие минимально допустимого радиуса. Минимальный допустимый радиус изгиба ОМ ОВ составляет 10 см. При таком изгибе световые импульсы распространяются наименьшими искажениями. Изгиб волокна допустимого уровня, увеличивает эффект рассеяния через оболочку. Минимальный изгиб волокна должен быть указан со стороны производителя. При обмотке кабеля в катушку, волокно изгибается по радиусу катушки. При прокладке кабеля в учреждениях понадобится изгибать его в углах учреждения. Изгиб волокна недопустимого уровня может вывести из строя кабеля и даже привести к обрывам волокон в кабеле.

Вид макроизгиба показан на рис. 2.7.,а [5].



а)



б)

Рис. 2.7. Макроизгиб (а) и микроизгиб (б) оптического волокна

Дефекты и несовершенства оптического волокна приводят к некачественному монтажу ОВ. Факторов, приводящих к потерям в оптическом волокне можно классифицировать следующим образом:

- несогласованность размеров сердцевины волокна и с его эксцентриситетом;
- различие профилей показателей преломления волокон;
- несносность и скрещивание продольных осей при соединении волокон;
- различие углов апертур волокон; неплоскостность и плохая обработка торцов волокон;
- неплотное соединение концов волокон с образованием воздушной прослойки потерь на френелевское отражение.

Все эти факторы увеличивают затухание и потери. Для их уменьшения предъявляются высокие требования в производстве к высокой точности геометрии волокна.

2.3. Дисперсия оптических сигналов на линиях связи

При передаче полезного информационного сигнала по оптическому волокну важную роль играет не только затухание оптической мощности по мере распространения сигнала, но и искажение формы сигнала за счет дисперсии различного рода. Дисперсия приводит к расплыванию (уширению) сигнала и предостаточно большом уширении импульсные сигналы

начинают перекрываться, что приводит к невозможности их выделения при приеме.

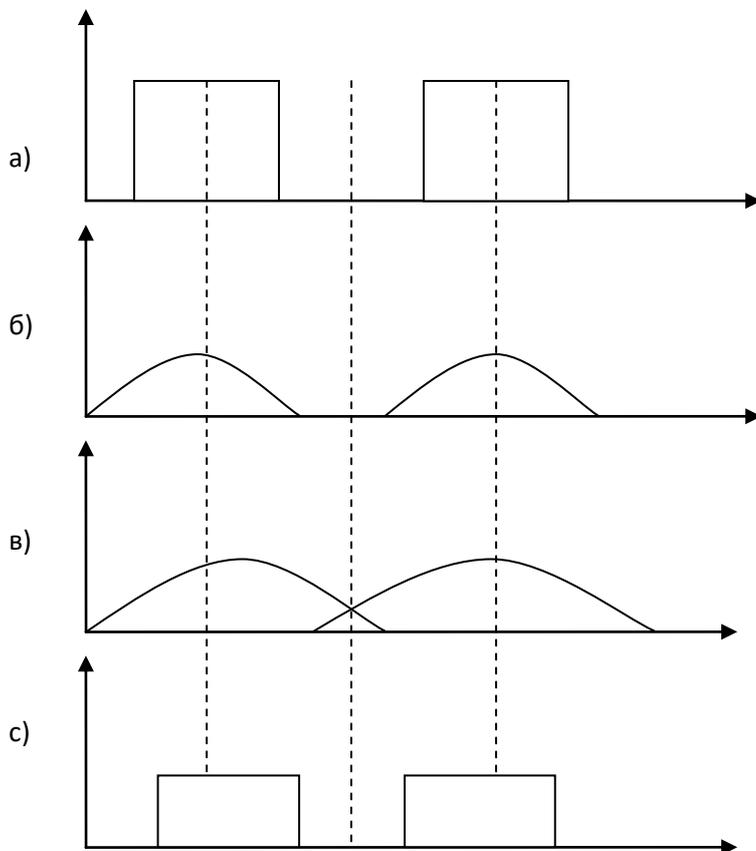


Рис. 2.8. Уширение оптических импульсов

Дисперсия оптического волокна – уширение оптических импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе ($\tau_{\text{ВЫХ}}$) и входе ($\tau_{\text{ВХ}}$) оптического волокна длины L по формуле [6]:

$$\tau = \tau_{\text{ВЫХ}}^2 - \tau_{\text{ВХ}}^2 \quad (2.6)$$

Дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км.

Дисперсия характеризуется тремя основными факторами [6]:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия);

- направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия);
- свойствами материала оптического волокна (материальная дисперсия).

Результирующая дисперсия определяется из формулы

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{ММ}}^2 - \tau_{\text{ХР}}^2} = \sqrt{\tau_{\text{ММ}}^2 - (\tau_{\text{В}} - \tau_{\text{МАТ}})^2}, \quad (2.7)$$

где $\tau_{\text{ММ}}$ и $\tau_{\text{ХР}} = \tau_{\text{В}} + \tau_{\text{МАТ}}$ – расширение импульса на выходе ОВ относительно импульса, поданного на его вход, имеющее место в результате межмодовой и хроматической дисперсии соответственно.

Виды дисперсии

Межмодовая дисперсия. Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения мод, и имеет место только в ММ-волокне. В ММ-световоде, в котором может распространяться большое число мод, проходящий по нему импульс размывается, так как групповые скорости мод различны. На выходе световода приходят большое количество мод, у каждой из которых своя скорость распространения. Поэтому выходной сигнал размыт во времени [6].

В оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления излучение распространяется по зигзагообразным, а в оптическом волокне с плавным профилем показателя преломления – по спиральным траекториям.

Периферийные лучи распространяются по более длинной траектории, чем лучи центральной области. Это приводит к разнице групповых скоростей различных мод. Для оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления при $n_c - n_{об} = 0,01$ временная задержка между крайними траекториями лучами составляет порядка 25 нс/км, а для градиентного оптического волокна эта величина на два порядка меньше. Однако на практике для ступенчатых оптических волокон

взаимодействии уменьшению значений эффективной числовой апертуры и межмодовой дисперсии.

Хроматическая дисперсия. Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении, как в ОМ, так и в ММ-волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в ОМ-волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии. Материальная дисперсия является характеристикой собственно материала сердцевины световода и соответствует объёмной среде (собственная фундаментальная характеристика материала, ограничивающая широкополосность оптического волокна для данного спектра излучения передаваемого сигнала). Волноводная дисперсия проявляется в волноводной среде, образованной, по крайней мере, двумя областями с разными показателями преломления (сердцевина и оболочка световода) [7].

Материальная дисперсия определяется электромагнитным взаимодействием световой волны со связанными электронами материала среды. Это взаимодействие зависит от длины волны. Возникновение материальной дисперсии обусловлено тем, что любой источник оптического излучения генерирует импульсы, имеющие непрерывный волновой спектр определённой ширины. Дисперсия материала обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны излучения [7].

Волноводная дисперсия. В волноводной среде значения эффективных показателей преломления для каждой моды, по её траектории, не совпадают. При этом появляется особая волноводная составляющая дисперсии, зависящая от величин материальной дисперсии сердцевины и оболочки световода, а также радиуса сердцевины, разности показателей преломления сердцевины и оболочки, числа оболочек. Волноводная дисперсия проявляется даже при отсутствии зависимости показателя преломления от длины волны и обусловлена влиянием геометрической структуры оптического волокна. Действие волноводной дисперсии приводит к сдвигу длины волны нулевой дисперсии. Применение нескольких слоёв оболочки приводит к

изменению параметров волноводного тракта, позволяет сдвинуть длину волны нулевой дисперсии [7].

Поляризационная модовая дисперсия. Свет, распространяющийся в номинально ОМ волокне, можно представить в виде суммы двух поляризационных мод. Каждая поляризационная мода распространяется параллельно оси волокна со своим значением фазовой и групповой скоростей. Фазовый фронт у волн плоский, а нормаль к плоскости фазового фронта параллельна оси волокна. Пространственное распределение полей у поляризационных мод волокна одинаковое (гауссово), и отличаются они только тем, что поляризованы ортогонально. На практике оптические волокна имеют не идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных мод и возникновению уширения (дисперсии) информационного сигнала.

Зависимость дисперсии от типа волокна. Межмодовая дисперсия преобладает в ММ ОВ и обусловлена отличием времени прохождения мод по ОВ от его входа до выхода. Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления скорость распространения электромагнитных волн с длиной волны λ одинакова и равна $v = c * l * n_1$, где c – скорость света, l – длина волокна. В этом случае все лучи, падающие на торец ОВ под углами к его оси в пределах $0 < \theta < \theta_A$, достигают приемного устройства с некоторым временным сдвигом, что, естественно, приводит к увеличению длительности принимаемого импульса [7]. Межмодовая дисперсия градиентных ОВ, как правило, на порядок и более ниже, чем у ступенчатых волокон. Это обусловлено тем, что за счет уменьшений показателя преломления от оси ОВ в боковой скорости распространения лучей вдоль их траекторий – так, на траекториях, близких к оси, она меньше, а удаленных – естественно, больше. Следовательно, лучи, распространяющиеся кратчайшими траекториями (ближе к оси), обладают меньшей скоростью, а лучи, распространяющиеся по более протяженным

траекториям, имеют большую скорость. В результате время импульса становится меньше. Так как межмодовая дисперсия независит от характеристик источника излучения, для ММволокон ее оценивают по полосе пропускания ОВ (МГц·км) [7].

Согласно геометрической интерпретации распространения оптических лучей по ОВ, время распространения луча зависит от угла θ_n и определяется выражением

$$tg(\theta_n) = L \cdot n_1 / c \cdot \cos(\theta_n) \quad (2.8)$$

Так как минимальное время распространения оптического луча имеет место при $\theta=0$, а максимальное при $\theta=\theta_{кр}$, соответствующие им значения времени распространения можно записать как [7]:

$$\theta_{мин} = L \cdot n / c \text{ и } t_{макс} = L \cdot n_1 / c \cdot \cos(\theta_{кр}) \quad (2.9)$$

откуда значение межмодовой дисперсии равно

$$\tau_{мм} = t_{макс} - t_{мин} = \frac{L}{c} n_1 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{n_1 \Delta}{c} L \quad (2.10)$$

Из последнего выражения следует, что межмодовая дисперсия возрастает с увеличением длины волокна. Однако это справедливо только для идеального волокна, в котором взаимодействие между модами отсутствует. В реальных условиях наличие неоднородности, кручение и изгиб волокна приводят к постоянным переходам энергии из одних мод в другие — *взаимодействию мод*, в связи с чем дисперсия становится пропорциональной \sqrt{L} . Это явление проявляется не сразу, а после определенного расстояния прохождения световой волны, которое носит название *длины установившейся связи мод*. Это значение принимается равным 5 – 7 км для ступенчатого волокна и 10 – 15 км для градиентного и установлено эмпирическим путем. В градиентных ММ волокнах время распространения оптических лучей, как было показано

выше, определяется законом изменения показателя преломления и при определенных условиях выравнивается, что естественно, влечет к уменьшению дисперсии. Так, при параболическом профиле показателя преломления $q=2$ значение модовой дисперсии будет определяться выражением:

$$\tau_{\text{мм}} = \frac{L\Delta^2}{c^2} n_1, \quad (2.11)$$

а при $q_{\text{опт}} = \sqrt{2(1 - 2\Delta)}$ она достигает минимального значения, равного

$$\tau_{\text{мм}} = \frac{L\Delta^2}{c^8} n_1, \quad (2.12)$$

Отличие времени распространения каждой из направляемых мод, образующих сигнал, от частоты спектра источника оптического излучения приводит к возникновению так называемой *хроматической* (частотной) *дисперсии*, которая, в свою очередь, складывается из *внутримодовой* (волноводной) *дисперсии* и *материальной дисперсии*.

Первый тип дисперсии обусловлен направляющими свойствами сердцевинны ОВ, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения, что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия в первую очередь определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника $\Delta\lambda$, т. Е [7].

$$\tau_{\text{в}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (2.13)$$

где $M(\lambda)$ -удельная внутримодовая дисперсия. Второй тип дисперсии вызван зависимостью показателя преломления сердцевинны от длины волны $n_1(\lambda)$, что, как и в предыдущем случае, приводит к различным скоростям распространения спектральных составляющих источника излучения.

Возникающая при этом различная задержка частотных составляющих распространяющегося в ОВ излучения, определяет дисперсию материала, которая равна [6]

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = \frac{L\lambda}{c} \left| \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} \right| \Delta\lambda, \quad (2.14)$$

Здесь следует отметить, что материальная дисперсия кварцевого ОВ при определенной частоте имеет нулевое значение, так как при длине волны $\lambda = 1,28 \text{ мкм}$ она изменяет свой знак. Эта точка носит название *точки нулевой материальной дисперсии*. Очевидно, что, изменяя соотношение между модовой и материальной дисперсией, точку нулевой дисперсии можно перемещать в небольших пределах

В нормальных условиях материальная дисперсия преобладает над волноводной, причем обе ее составляющие могут иметь противоположный знак и различаться характером зависимости от длины волны. В ряде случаев это позволяет оптимизировать профиль показателя преломления волокна путем минимизации суммарной дисперсии на определенной длине волны за счет взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсии. Известно, что для кварцевых ОВ минимум затухания соответствует длине волны $1,55 \text{ мкм}$ и при больших скоростях передачи дальность связи на этой длине волны может ограничиваться дисперсией, поэтому для ее снижения осуществляется выбор соответствующего профиля показателя преломления ОВ. Так как хроматическая дисперсия зависит от длины световой волны и, следовательно, от ширины спектра источника оптического излучения, она нормируется в $\text{пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$.

ОВ со смещенной дисперсией обеспечивают минимальную дисперсию только на одной длине волны, это затрудняет применение мультиплексирования для работы на нескольких оптических несущих в окне прозрачности ОВ. Поэтому с целью минимизации дисперсии во всем окне

прозрачности используют волокна со сглаженной дисперсией, которые также выполняются с различными профилями показателей преломления.

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого ОМ волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна [6]. Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением:

$$\tau_{\text{chr}}(\lambda) = D(\lambda) \Delta\lambda, \quad (2.15)$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника. К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков ($\Delta\lambda = 2$ нм), и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии. Существует множество типов профилей показателей преломления ОМ оптических волокон, которые, помимо требуемой минимизации хроматической дисперсии, обеспечивают также необходимые механические характеристики, минимизацию рэлеевских потерь, технологичность производства и прокладки ОВ ит. д. Сравнивая различные ОВ по их дисперсионным характеристикам, можно отметить, что лучшими в этом плане являются ОМ волокна и градиентные

волокна с плавным законом изменения показателя преломления, хотя градиентные волокна имеют худшие характеристики по сравнению с ОМ. Рассмотрим, что происходит при учете поляризационной модовой дисперсии. Все происходит точно так же, как и в случае распространения плоской волны в свободном пространстве. Хорошо известно, что плоскую волну всегда можно представить в виде двухортогонально поляризованных плоских волн. Как и у плоских волн, у поляризационных мод состояние поляризации может быть также любым, однако обычно используют линейно поляризованные моды индексом 01. Делается это из удобства, так как в волокнах, как правило, преобладает линейное двулуче преломление.

Показатель преломления у телекоммуникационных волокон хоть и слабо, но зависит от состояния поляризации света, т. е. эти волокна обладают двулуче преломлением, причем в основном линейным. Оно наводится в номинально круглом волокне при его изготовлении из-за неизбежного появления небольшой эллиптичности сердцевины и внутренних напряжений, не обладающих аксиальной симметрией. Так как наведенные в волокне напряжения не имеют выделенного направления, величинами азимут линейного двулуче преломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна [8].

Хотя поляризационная анизотропия распределена по длине волокна нерегулярно, однако участок волокна менее длины корреляции нерегулярностей двулучепреломления можно рассматривать как однородный. На этом участке волокно обладает примерно постоянным по величине двулучепреломлением. В нем можно возбудить быструю и медленную поляризационные моды, которые будут распространяться вдоль волокна, не обмениваясь при этом мощностью. Фазовые скорости этих поляризационных мод обратно пропорциональны величине показателей преломления:

$$v_6 = c/n_6 \quad (2.16)$$

и

$$v_m = c/n_m. \quad (2.17)$$

А разность их фазовых набегов прямо пропорциональна разности показателей преломления и длине участка волокна [8]:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{L}{v_i} - \frac{L}{v_a}\right) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \Delta n L. \quad (2.18)$$

Если возбудить одновременно обе поляризационные моды, то состояние света будет периодически изменяться вдоль волокна с периодом, равным длине биений. Длина биений находится из условия, что разность фазовых набегов поляризационных мод равна 2π и выражается через разность показателей преломления:

$$L_a = \lambda/\Delta n. \quad (2.19)$$

У телекоммуникационных волокон на $\lambda=1550$ нм длина биений составляет примерно 5 м, что соответствует разности показателей преломления $\Delta n=3 \cdot 10^{-7}$.

Двулучепреломление приводит не только к появлению разности фазовых запаздываний поляризационных мод, но и к появлению у них разности групповых запаздываний и, соответственно к уширению импульсов [8]:

$$\Delta\tau(nc) = \delta\tau\left(\frac{nc}{\text{км}}\right) \cdot L(\text{км}), \quad (2.20)$$

где $\delta\tau$ -разности групповых запаздываний поляризационных мод на единице длины волокна. Так как в первом приближении фазовые и групповые скорости поляризационных мод примерно равны друг другу, то с помощью 1 и 2 находим:

$$\delta\tau \approx \left(\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}\right) = \Delta n/c. \quad (2.21)$$

Полагая, что $\Delta n=3 \cdot 10^{-7}$ и $c=3 \cdot 10^5$ км/с, получаем оценку $\delta\tau=1nc/\text{км}$.

В волокнах с регулярным (постоянным по длине волокна) двулучепреломлением можно избежать уширения импульса из-за разности групповых запаздываний. Для этого достаточно, чтобы направление поляризации на входе в такое волокно совпало с направлением оси двулучепреломления волокна. Тогда в волокне возбуждятся только одна поляризационная мода, и импульс расширяться не будет. Однако длина волокна обычно значительно превышает длину корреляции его неоднородностей. В таком волокне неизбежно возбуждается и вторая поляризационная мода, что и приводит к уширению импульсов [8]

3. РАСЧЕТ КОМПЕНСАТОРОВ ДИСПЕРСИИ

3.1. Методы увеличения дальности оптических систем передачи

Из вышеизложенных причин ограничения дальности оптических систем передачи является дисперсия в оптических волокнах. Для уменьшения влияния дисперсии применяются различные методы. В основу этих методов входят методы компенсации дисперсии. Эти методы следующие:

- применение волокон компенсирующие дисперсии;
- применение волокон с нулевым сдвигом дисперсии (NZDSF);
- применение компенсирующие дисперсии модуля;
- применение дифракционной решетки Брэгга.

В контексте эволюции ВОЛС ключевыми параметрами становятся методики, используемые для коррекции дисперсии в волоконно-оптических системах. *Коррекция дисперсии* позволяет увеличивать длину волоконно-оптических TDM систем, ранее ограниченных из-за большой дисперсии, и одновременно избежать влияния такого эффекта, как четырехволновое смешивание. В настоящее время имеются следующие три методики коррекции дисперсии:

- Использование *волокон с компенсирующей дисперсией* DCF (dispersion compensating fibers). Положительная дисперсия, накопленная на одном

участке с использованием стандартного волокна SF, может компенсироваться последующим примыкающим сегментом на основе волокна DCF с заранее подобранным значением отрицательной дисперсии, в результате чего итоговая хроматическая дисперсия может быть приближена к нулю. Компенсация хроматической дисперсии допустима в силу систематического характера накопления дисперсии с ростом длины;

- Использование оптических лазерных передатчиков с очень узкой спектральной шириной (0,1 нм и менее), способных модулировать излучение на частотах в несколько ГГц;
- Использование волокон типа NZDSF, в которых "сдвигается" длина волны нулевой дисперсии за пределы окна 1550 нм, в результате чего дисперсия становится достаточно большой, чтобы подавить эффект четырехволнового смешивания, в то же время достаточно малой, чтобы поддерживать распространение сигнала высокой емкости (высокой частоты модуляции) на большие расстояния.

3.2. Расчет компенсаторов дисперсии

Апертура волоконного световода. Рассмотрим двухслойное волокно, состоящее из диэлектрического сердечника с коэффициентом преломления и оболочки с коэффициентом преломления причем $n_1 > n_2$ (формула 2.3).

№	l	d	λ	n_1	n_2	$\Delta\lambda$	$\text{tg}\delta$	K_p	$\alpha_{\text{пр}}$	α_k	Тип волны	Система передачи
1	30	50	1,3	1,51	1,495	2	4	1,2	0	3	EH ₁₂	ИКМ-480
2	50	10	1,55	1,51	1,505	0,8	3	1	0	1	HE ₁₁	ИКМ-1920

Для ММ ОК

$$NA_0 = \sin\theta_{кр} = \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = \sqrt{0,0451} = 0,21$$

Для ОМ ОК

$$NA_0 = \sin\theta_{кр} = \sqrt{1,51^2 - 1505^2} = \sqrt{0,0151} = 0,13$$

Критические длины волн и частоты. Световоды, как и волноводы имеют частоту отсечки (критическую частоту f_0) и по ним возможна передача лишь волн, длина которых меньше диаметра сердцевины световода ($\lambda < d$).

$$f_0 = \frac{P_{nm} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ Гц} \quad (3.1)$$

Для ММ ОК

$$f_0 = \frac{7,016 * 3 * 10^8}{3,14 * 50 * 10^{-6} * 0,21} = 0,638 * 10^{14} \text{ Гц}$$

Для ОМ ОК

Из за $P_{nm} \neq 0$, критическая длина для ОМ ОК

Соответственно, критическая длина волны;

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ мкм} \quad (3.2)$$

Для ММ ОК

$$\lambda_0 = \frac{3,14 * 50 * 10^{-6}}{7,016 * 1,51} * 0,21 = 3,11 \text{ мкм}$$

Для ОМ ОК

$$\lambda_0 = 0$$

Где P_{nm} - параметр, характеризующий тип волны ;

c - скорость света;

d - диаметр сердечника.

Значения P_{nm} для различных типов волн

Таблица 3.1

n	Значение P_{nm} при m			Тип волн
	1	2	3	
0	2,405	5,52	8,654	Е,Н
1	0	3,832	7,016	Н,Е
1	3,832	7,016	10,173	Е,Н
2	5,136	8,417	11,62	Н,Е

Нормированная частота. Важнейшим обобщенным параметром волоконного световода, используемым для оценки его свойств, является нормированная частота

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.3)$$

Где λ - длина волны в вакууме.

Для ММ ОК

$$V = \frac{3,14 * 50}{1,3} * 0,21 = 25,36$$

Для ОМ ОК

$$V = \frac{3,14 * 10}{1,55} * 0,13 = 2,63$$

При такой трактовке табл. 3.1 содержит нормированные частоты отсечки для волн, тип которых указан в правой колонке таблицы, а индекс nm составлен из чисел левого столбца и верхней строки, соответствующей клетке, в которой находится данная величина. Каждой V_0 соответствует критическая частота f_0

Число мод. Моды отличаются распределением электрических и магнитных полей в поперечном сечении световода и характеризуются индексами n и m .

Число типов волн (мод) в световоде зависит от диаметра сердечника d и длины волны λ .

Для ОМ ОВ ($d \approx \lambda$) нормированная частота, как было сказано ранее, лежит в пределах $0 < K < 2,405$ (волна HE_{11}).

С увеличением значения V , количество мод, передаваемых по ОВ, увеличивается.

Для определения числа мод (N), передаваемых по многомодовому ОВ ($d \approx \lambda$), можно воспользоваться формулами:

$$N = \frac{V^2}{2} - \text{для ступенчатого волокна;}$$

$$N = \frac{V^2}{4} - \text{для градиентного волокна.} \quad (3.4)$$

Для ММ ОК

$$N = \frac{V^2}{4} = \frac{25,36^2}{4} = 160,78 \approx 161$$

Достоинством ОМ систем являются весьма широкий диапазон частот и большая пропускная способность. С увеличением числа мод полоса передаваемых частот снижается; ОМ система - несколько гигагерц, маломодовая - сотни мегагерц, ММ-десятки мегагерц. Однако ОМ системы из-за малого диаметра сердечника волокна менее надежны и имеют большие потери на вводе в световод, поэтому они требуют мощных когерентных источников с узкой диаграммой направленности, т.е. квантовых генераторов.

Для ММ систем можно использовать простейшие некогерентные источники излучения - светодиоды, имеющие малую мощность и меньшую пропускную способность.

Затухание ОВ. Затухание α определяет длину регенерационных участков (расстояния между регенераторами) и для трактов ОК обусловлено собственными потерями в волоконных световодах α_c и дополнительными потерями, так называемыми кабельными α_k , обусловленными скруткой, а также деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления ОК.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k, \quad (3.5)$$

$$\alpha_c = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} \quad (3.6)$$

Для ММ ОК

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k = 126,78 * 10^{-5} + 0,42 = 0,4213, \text{ дБ/км}$$

$$\alpha_c = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} = 3 + 0,4213 = 3,4213, \text{ дБ/км}$$

Для ОМ ОК

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k = 79,75 * 10^{-5} + 0,17 = 0,1708, \text{ дб/км}$$

$$\alpha_c = \alpha_{\Pi} + \alpha_p = 1 + 0,1708 = 1,1708, \text{ дб/км}$$

где α_n - потери на поглощение (зависят от чистоты материала и при наличии посторонних примесей (α_{np}) могут достигать значительной величины($\alpha_n + \alpha_{np}$);

α_p - потери на рассеяние обусловленные неоднородностями материала волоконного световода, расстояние между которыми меньше длины волны и тепловой флуктуацией показателя преломления.

Затухание за счет поглощения связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала световода ($tg\delta$) и рассчитываются по формуле;

$$\alpha_{\Pi} = 8,69 \frac{\pi n_1}{\lambda} tg\delta, \text{ дб/км}, \quad (3.7)$$

Для ММ ОК

$$\alpha_{\Pi} = 8,69 \frac{3,14 * 1,51}{1,3^{-6}} * 4 * 10^{-11} = 126,78 * 10^{-5}, \text{ дб/км}$$

Для ОМ ОК

$$\alpha_{\Pi} = 8,69 \frac{3,14 * 1,51}{1,55^{-6}} * 3 * 10^{-11} = 79,75 * 10^{-5}, \text{ дб/км}$$

где $tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь в световоде.

Все прозрачные материалы рассеивают свет. Рассеивание на частотах $10^{14} \dots 10^{15}$ Гц обусловлено тепловым движением атомов, составляющих вещество. Поэтому оно принципиально не устранимо и вносит затухание в

световоде даже в том случае, когда потери света на поглощение практически равны нулю.

Величины потерь на рассеяние, называемые релеевскими, можно определить по формуле;

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{k_p}{\lambda^4}, \text{дб/км} \quad (3.8)$$

Для ММ ОК

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{1,2}{1,3^4} = 0,42, \text{дб/км}$$

Для ОМ ОК

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{1}{1,55^4} = 0,17, \text{дб/км}$$

где k_p – коэффициент рассеяния (величина зависит от типа материала волокна).

Коэффициент фазы. Важнейшим параметром, определяющим форму сигнала, качество и скорость передачи по линии связи является коэффициент распространения β (или коэффициентом фазы).

β меняется от значения волнового числа в оболочке k_2 (при $f=f_0$) до волнового числа среды в сердечнике k_1 (при $f_0 \rightarrow \infty$), т.е.

$$k_2 \leq \beta \leq k_1, \text{рад/км}, \quad (3.9)$$

где

$$k_1 = \frac{\omega n_1}{c}, \text{рад/км},$$

$$k_2 = \frac{\omega n_2}{c}, \text{рад/км}, \quad (3.10)$$

Для ММ ОК

$$k_1 = \frac{\omega n_1}{c} = \frac{2\pi f_0 n_1}{c} = \frac{0.638 * 10^{14} * 2 * 3.14 * 1.51}{3 * 10^8} = 2.017 * 10^6$$

$$k_1 = \frac{\omega n_1}{c} = \frac{2\pi f_0 n_2}{c} = \frac{0.638 * 10^{14} * 2 * 3.14 * 1.495}{3 * 10^8} = 1.988 * 10^6$$

Для ОМ ОК

Из за $f_0 = 0$, k_1 и $k_2 = 0$

Фазовая скорость. Фазовая скорость равна $v_\phi = \omega/\beta$. При критической длине волны v_ϕ равна скорости в оболочке световода. С ростом частоты и, соответственно, уменьшением длины волны энергия все больше концентрируется в сердечнике световода, затухание растет и скорость распространения определяется параметрами сердечника. При очень высоких частотах скорость становится равной скорости распространения в сердечнике. Соотношение между фазовой скоростью и скоростью распространения волны в сердечнике и оболочке световода имеет вид:

$$\frac{c}{n_1} \leq v_\phi \leq \frac{c}{n_2}, \text{ км/с} \quad (3.11)$$

Для ММ ОК

$$\frac{3 * 10^8}{1,51} \leq v_\phi \leq \frac{3 * 10^8}{1,495}$$

$$1,987 * 10^8 \leq v_\phi \leq 2,01 * 10^8$$

Для ОМ ОК

$$\frac{3 * 10^8}{1,51} \leq v_\phi \leq \frac{3 * 10^8}{1,505}$$

$$1,987 \cdot 10^8 \leq v_{\phi} \leq 1,99 \cdot 10^8$$

Волновое сопротивление. Волновое сопротивление $z_{\text{в}}$ может быть определено на основании выражений для электрического и магнитного полей. Однако такие выражения получаются довольно сложными. На практике обычно пользуются предельными значениями волнового сопротивления сердцевины (z_0/n_1) и оболочки (z_0/n_2) для плоской волны,

где $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,7 \text{ Ом}$ - волновое сопротивление идеальной среды.

В реальных условиях волновое сопротивление волновода ($z_{\text{в}}$) имеет промежуточное значение:

$$\frac{z_0}{n_1} < z_{\text{в}} < \frac{z_0}{n_2} \quad (\text{численно около } 250 \div 260 \text{ Ом}). \quad (3.12)$$

Для ММ ОК

$$\frac{376,7}{1,51} \leq z_{\text{в}} \leq \frac{376,7}{1,495}$$

$$249,48 \leq z_{\text{в}} \leq 252$$

Для ОМ ОК

$$\frac{376,7}{1,51} \leq z_{\text{в}} \leq \frac{376,7}{1,505}$$

$$249,48 \leq z_{\text{в}} \leq 250,3$$

Дисперсия и пропускная способность

$$\tau = \sqrt{t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2} \quad (3.13)$$

Значения $t_{вх}$ и $t_{вых}$ берутся на уровне половины амплитуды импульсов.

Дисперсия обусловлена тремя причинами:

- зависимостью показателя преломления среды от длины волны света;
- зависимостью коэффициента распространения (фазы) собственных (направляемых волн) от длины волны света;
- разбросом групповых времен пробега направляемых волн. .

Два первых эффекта имеют большое значение при использовании ОМ волокна, последний - при использовании ММ волокна. Изменение длины волны света, в свою очередь, обусловлено двумя причинами:

- модуляцией сигнала;
- частичной когерентностью или даже некогерентностью источника, возбуждающего волокно.

Результирующее уширение импульса за счет модовой $\tau_{мод}$, материальной $\tau_{мат}$ и волноводной $\tau_{в}$ дисперсий определяется по формуле:

Расчет дисперсии в ОМ волокне. С учетом реального соотношения вкладов отдельных видов дисперсий уширение импульсов для ОМ волокон:

$$\tau = \tau_{мат} + \tau_{в} \quad (3.14)$$

$$\tau = 480 - 480 = 0, \text{ пс}$$

где $\tau_{мат}$ - материальная дисперсия обусловленная зависимостью показателя преломления от длины волны;

$\tau_{в}$ - волноводная дисперсия, обусловленная процессами внутри моды и характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

Для расчета $\tau_{мат}$ и $\tau_{в}$ часто пользуются экспериментальными данными и упрощенными формулами:

$$\tau_B = \Delta\lambda * l * B(\lambda), \text{нс} \quad (3.15)$$

$$\tau_B = 0,8 \text{ нм} * 50 \text{ км} * 12 \frac{\text{пс}}{\text{нс} * \text{км}} = 480 \text{ пс}$$

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda * l * M(\lambda), \text{нс} \quad (3.16)$$

$$\tau_{\text{мат}} = 0,8 \text{ нм} * 33,3 \text{ км} * (-18) * \frac{\text{пс}}{\text{нс} * \text{км}} = -480 \text{ пс}$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектральной линии источника излучения, км;

l - длина линии связи, км;

$M(\lambda)$ и $B(\lambda)$ - удельные материальная волноводная дисперсии соответственно.

Удельные дисперсии выражаются в пикосекундах на километр длины световода и на метр ширины спектра. Величины $M(\lambda)$ и $B(\lambda)$ для кварцевого стекла приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Удельная дисперсия, Пс/нм*км	Длина	волны	λ , мкм
	0,85	1,3	1,55
$B(\lambda)$	5	8	12
$M(\lambda)$	125	-5	-18

Расчет дисперсии в ММ волокне

Для ММ волокна;

$$\tau \approx \tau_{\text{мод}}$$

где $\tau_{\text{мод}}$ - обусловлена наличием большого числа мод, время распространения которых различно.

Величина уширения импульса в ММ волокнах за счет модовой дисперсии может определена по следующим формулам: для ступенчатого волокна:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta}{c} \sqrt{l * l_c}, \text{ нс} \quad (3.17)$$

для градиентного волокна;

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2}{2c} \sqrt{l * l_c}, \text{ нс} \quad (3.18)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - 0,99 = 0,01$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{10^{-4}}{2 * 3 * 10^8} \sqrt{45} = 1,11 * 10^{-3}, \text{ нс}$$

где Δ - соотношение показателей преломления ($\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$)

n_1 - показатель преломления сердцевины ОВ;

l - длина линии связи, км

c - скорость света;

l_c - длина связи мод, при которой наступает установившийся режим (0,7 км для ступенчатого волокна и 1,5 км для градиентного волокна).

При определении модовой дисперсии надо иметь в виду, что до определенной длины l_c межмодовой связи нет и расчет $\tau_{\text{мод}}$ можно производить по следующим формулам:

для ступенчатого волокна:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta}{c} l, \text{ нс}, \quad (3.19)$$

для градиентного волокна:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2}{2c} l, \text{ нс} \quad (3.20)$$

А затем при $l \geq l_c$ происходит процесс взаимного преобразования мод и наступает установившейся режим. При этом $\tau_{\text{мод}}$ рассчитывается по формулам (3.17), (3.18).

Определение длины регенерационного участка. В настоящее время цифровые волоконно-оптические системы передачи (ЦВОСП) создаются как сочетание волоконно-оптического линейного тракта с унифицированной каналообразующей аппаратурой. Наиболее существенной особенностью линейных трактов ЦВОСП является большая длина участка регенерации, которая определяется двумя факторами: энергетическими соотношениями и дисперсионными искажениями. В качестве каналообразующей аппаратуры и оборудования сопряжения используется аппаратура ИКМ, основные параметры которой приведены в табл. 3.1.

Длину регенерационного участка ВОЛС при использовании ЦСП можно определить следующим образом. Длину регенерационного участка выбирают по наименьшему значению l_α или $l_{\Delta F}$, но так, чтобы выполнялось требование по затуханию сигнала α и пропускной способности ΔF .

$$\Delta F = \frac{l}{\tau}, \text{ Гц.} \quad (3.21)$$

Для ММ ОК

$$\Delta F = \frac{30 \text{ км}}{1,11 * 10^{-12}} = 27,03 * 10^{15}, \text{ Гц}$$

Для ОМ ОК

$$\Delta F = \frac{50 \text{ км}}{1,11 * 10^{-12}} = 45,05 * 10^{15}, \text{ Гц}$$

Как видно из рис. 2.3 с увеличением длины линии возрастает затухание цепи α , которое не должно превышать энергетический потенциал системы передачи (\mathcal{E}).

На этом же рисунке показан характер зависимости пропускной способности ΔF оптического кабеля от длины линии l . Дисперсия приводит

как к ограничению пропускной способности ОК, так и к снижению дальности передачи по ним.

Полоса пропускания на всю линию определяется по формуле:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F}{l_x} \text{ - для коротких линий } (l < l_c), \quad (3.22)$$

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F}{\sqrt{l_x * l_c}} \text{ - для длинных линий } (l \geq l_c), \quad (3.23)$$

Для ММ ОК

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F}{\sqrt{l_x * l_c}} = \frac{27,03 * 10^{15}}{\sqrt{45} \text{ км}} = 4,03 * 10^{12}, \text{ Гц}$$

Для ОМ ОК

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F}{\sqrt{l_x * l_c}} = \frac{45,05 * 10^{15}}{\sqrt{75} \text{ км}} = 5,19 * 10^{12}, \text{ Гц}$$

где ΔF - километрическое значение полосы пропускания.

Пропускная способность световода, также зависит и от используемой системы передачи. Выбранная аппаратура задает скорость передачи цифрового потока V . При включении аппаратуры ИКМ в ВОЛС используется как правило, линейный код типа $mVnV$. Это приводит к увеличению скорости передачи цифрового потока в nm раз.

Таким образом, реальная скорость передачи в линейном тракте составит:

$$V_A = V \frac{n}{m}. \quad (3.24)$$

Например, для ИКМ - 480, при использовании линейного кода типа $5V6V$ скорость передачи в линейном тракте будет равна

$$V_A = \Delta F_{\text{доп}} = 34,368 * \frac{6}{5} = 41,2416 \text{ Мбит/с.}$$

Таблица 3.3

Характеристики	Система передачи		
	(ИКМ-120)- 5	(ИКМ-480)- 5	(ИКМ- 1920)-5
Число каналов	120	480	1920
Скорость передачи, В, Мбит/с	8,448	34,368	139,264
Тип световода	ступенчатый	градиентный	ОМ
Энергетический потенциал аппаратуры, э, дБ	50	38	38
Длина волны, мкм	0,85	1,3	1,55
Тип линейного кода, mBnB	1B2B	5B6B	2B6B

Сегменты на основе волокна SF без использования коррекции дисперсии допускают протяженность до 90 км (при скорости передачи 2,4 Гбит/с). Первые две методики коррекции дисперсии, применяясь отдельно друг от друга или в комбинации, позволяют увеличить протяженность сегментов до 140 км при сохранении прежней скорости передачи, табл. 2.8 а.

Пример 1. Стандарт АТМ 622 Мбит/с (STM-4) для одномодового волокна. Оптический интерфейс АТМ 622 Мбит/с использует кодировку 8В/10В, что соответствует частоте модуляции 778 МГц. При использовании лазера с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) удельная полоса пропускания для ступенчатого одномодового волокна 8/125 составляет 252000 МГц-км (12600х20) и при длине оптического сегмента 100 км будет 2520 МГц, что значительно больше 778 МГц. То есть, с точки зрения дисперсии, при использовании лазера с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) протяженность в 100 км является допустимой, даже если применяется стандартное ступенчатое волокно.

Пример 2. Передача супер-сигнала на частоте 100 ГГц по одномодовому волокну со смещенной дисперсией DSF. При использовании лазеров с $\Delta\lambda = 0,1$ нм (1550 нм) удельная полоса пропускания для DSF 8/125 составляет более 2400 ГГц-км (20 x 120000 МГц-км) и при длине оптического сегмента 20 км будет 120 ГГц, что незначительно превосходит 100 ГГц. То есть, с точки зрения дисперсии, протяженность сегмента в 20 км находится на грани предельного допустимого расстояния. Именно поэтому оптические супер-сети со скоростью передачи на канал 100 Гбит/с имеют ограниченный масштаб, например масштаб города.

Чтобы удовлетворить рабочим требованиям при планировании сети, следует тщательно выработать стратегию наращивания сети. Нужно оценивать соответствующие топологии сетей с учетом возможности их работы на скоростях 2,4 и 10 Гбит/с. Ближайшая цель - построить протяженные участки (до 120-140 км) при передаче на скорости 2,4 Гбит/с с использованием любых из трех главных типов волокон - должна рассматриваться совместно с планами более далекой перспективы - инсталляция линий на скорость передачи 10 Гбит/с с использованием последовательно установленных линейных усилителей. Высокая скорость передачи в последнем случае может быть достигнута путем оптимизации длины сегментов меж-ДУ линейными усилителями (приблизительно 70 км).

Хотя волокна SF и DSF вполне приемлемы для осуществления наращивания сегментов сетей, волокно NZDSF более перспективно при использовании в новых инсталляциях. При сравнении волокон SF и DSF отметим, что SF лучше подходят для сетей, использующих волновое мультиплексирование. Недостаток SF - большое значение дисперсии в окне 1550 нм - может компенсироваться либо дополнительным участком на основе волокна с компенсирующей дисперсией, либо путем уменьшения спектральной ширины излучаемого сигнала (например, используя передатчики на основе DFB лазеров).

Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе SF, DSF и NZDSF приведены в табл. 2.8 а, б.

Общие возможности по развертыванию кабельных систем на основе различных типов одномодовых волокон Таблица 3.4.

а) Передача 2,5 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон

Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волок	Коррекция	Усилите	Число	Емкость	Длина	Ограничени
SF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	70-90 км	Мощность,
SF	Внешняя	УМ	1	2,4 Гбит/с	140 км	Мощность
SF	Компенсация	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140	Мощность
DSF	Нет	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140	Мощность
NZDSF	Х.О ВЫВОДИТСЯ ИЗ	УМ	1	2,4 Гбит/с	120-140 км	Мощность
Линейное усиление многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя	УМ.ЛУ	1,2,4,8	2,4-20	>500 км	ASE,
SF	Компенсация	УМ, ЛУ	1,2,4,8	2,4-20	4	ASE,
DSF	Нет	УМ.ЛУ	1-	2,4 Гбит/с	>500 км	ASE,
NZDSF	Хд выводится из зоны EDFA	УМ.ЛУ	1,2,4,8	2,4-20 Гбит/с	>500 км	ASE, отсутствует

б) Передача 10 Гбит/с сигнала (сигналов) по различным типам одномодовых волокон

Усиление мощности сигнала на одной длине волны						
Волок-	Коррекция	Усилител	Число	Емкость	Длина	Ограничени
SF	Внешняя	ПУ	1	10 Гбит/с	50-70 км	Дисперсия
SF	Внешняя	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-140	Мощность
DSF	Внешняя	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120.149к	Мощность

NZDS F	Внешняя модуляц	УМ, ПУ	1	10 Гбит/с	120-149 км	Мощность
Линейное усиление многоканального сигнала (нескольких длин волн)						
SF	Внешняя	ЛУ,	1,2,4	10, 20, 40	>300 км	ASE,
DSF	Внешняя модуляция	ЛУ, ПУ	1- (нелин. эффекты)	10 Гбит/с	>300 км	ASE, отсутствует плато, 4- wavemixing
NZDS F	Внешняя модуляция ,	ЛУ, ПУ	1,2,4	10, 20, 40 Гбит/с	>300 км	ASE, SPM, отсутствует плато

* - Компенсация дисперсии может требовать дополнительного усиления, чтобы преодолеть затухание.

Обозначения: УМ - усиление мощности, ЛУ - линейное усиление, КД - компенсация дисперсии, ПУ - приемное усиление, ASE - спонтанно усиленное излучение (amplifiedspontaneousemission), 4-wavemixing - четырехволновое смешивание, SPM - межфазная модуляция (self-phasemodulation)

4.ОХРАНА ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛС

При монтаже и эксплуатации оборудования применяемого в волоконно-оптических линиях связи, человек подвергается воздействию многочисленных производственных факторов, различных по своему происхождению, формам проявления, характеру действия и другим, в ряде случаев это воздействие оказывается неблагоприятным и даже опасным для здоровья.

4.1. Опасные факторы присутствующие при эксплуатации ВОЛС

Воздействие опасных факторов наносит ущерб здоровью человека почти мгновенно и приводит к такому негативному явлению, как производственный травматизм. К таким факторам при эксплуатации аппаратуры ВОЛС относятся;

- электрическое напряжение на токоведущих частях аппаратуры;
- отсутствие защитного заземления;
- лазерное излучение в любой точке обрыва ВОЛС или разъединения оптического соединителя;
- ошибки оператора или нарушение техники безопасности при наладке, ремонте и эксплуатации ВОЛС.

По опасности поражения электрическим током помещения в которых располагается аппаратура ВОЛС установлены как “Помещения с повышенной опасностью”. Поэтому в соответствии с правилами по технике безопасности в этих помещениях запрещается применение открытого огня, курения, использования самодельных электрических приборов. Не допускается загромождения проходов в помещении.

По степени воздействия лазерного излучения на человека, лазеры применяемые в современных системах связи относятся к классу опасности ЗБ. Полупроводниковый лазер, используемый в проектируемом передающем устройстве, рассчитан на работу во втором спектральном диапазоне ($380 < \lambda < 1400$) и имеет выходную оптическую мощность не более 3.5 мВт, что соответствует гигиеническим нормам для данного класса.

4.2. Лазерная безопасность

4.2.1. Воздействие лазерного излучения на органы зрения

Основной элемент зрительного аппарата человека - сетчатка глаза - может быть поражена лишь излучением видимого (от 0.4:мкм) и ближнего инфракрасного диапазонов (до 1.4 мкм), что объясняется спектральными

характеристиками человеческого глаза. При этом хрусталик и глазное яблоко, действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышают концентрацию энергии на сетчатке, что, в свою очередь, на несколько порядков понижает максимально допустимый уровень (МДУ) облученности зрачка.

4.2.2. Техничко-гигиеническая оценка лазерных изделий

В нашей стране на базе проведенных комплексных исследований и современных представлений о влиянии лазерного излучения на организм человека разработан и утвержден ряд нормативных документов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию лазерных изделий. Эти документы устанавливают единую систему обеспечения лазерной безопасности. В такую систему входят: технические средства снижения опасных и вредных производственных факторов, организационные мероприятия, контроль условий труда на лазерных установках. В современной отечественной научно-технической и нормативной литературе дано несколько вариантов классификации лазерных изделий. С позиции обеспечения лазерной безопасности их классифицируют по основным физико-техническим параметрам и степени опасности генерируемого излучения.

В зависимости от конструкции лазера и конкретных условий его эксплуатации обслуживающий его персонал может быть подвержен воздействию опасных и вредных производственных факторов, перечень которых приведен в ГОСТ 12.1.040-83. Уровни опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте не должны превышать значений, установленных по электробезопасности, взрывоопасности, шуму, уровням ионизирующего излучения, концентрации токсических веществ и др.

4.2.3. Классы опасности лазерного излучения по СНиП 5804-91

Степень воздействия лазерного излучения на оператора зависит от физико-технических характеристик лазера — плотности мощности (энергии излучения), длины волны, времени облучения, длительности и периодичности импульсов, площади облучаемой поверхности. Биологический эффект лазерного облучения зависит как от вида воздействия излучения на ткани организма (тепловое, фотохимическое), так и от биологических и физико-химических особенностей самих тканей и органов.

Наиболее опасно лазерное излучение с длиной волны:

380-7-1400 нм — для сетчатки глаза;

180-г380 нм и свыше 1400 нм — для передних сред глаза;

180-7-10 нм (т.е. во всем рассматриваемом диапазоне) — для кожи.

Гигиенистами выдвинуты требования, в соответствии с которыми, в основу проектирования, разработки и эксплуатации лазерной техники должен быть положен принцип исключения воздействия на человека (кроме лечебных целей) лазерного излучения, как прямого, так и зеркально или диффузно отраженного.

В соответствии со СНиП 5804-91 лазерные изделия по Степени опасности генерируемого излучения подразделяют на 4 класса. При этом: класс опасности лазерного изделия определяется классом опасности используемого в нем лазера. Классификацию лазеров с точки зрения безопасности проводит предприятие-изготовитель путем сравнения выходные характеристик излучения с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) при однократном воздействии. Определяя принадлежность лазерного изделия к тому или иному классу по степени опасности лазерного излучения, необходимо учитывать воздействие прямого или отраженного лазерного пучка на глаза и кожу человека и пространственные характеристики лазерного излучения. При этом различают коллимированное излучение, то

есть заключенное в ограниченном телесном угле, и неколлимированное, то есть рассеянное или диффузно отраженное. Использование дополнительных оптических систем не входит в понятие "коллимация", а оговаривается отдельно. Лазерные изделия с точки зрения техники безопасности классифицируют в основном по степени опасности генерируемого излучения. Установлены следующие 4 класса лазеров:

- первый класс - полностью безопасные лазеры, входное излучение которых не представляет опасности для глаз и кожи человека;

- ко второму классу относят лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении кожи и глаз человека коллимированным пучком. В то же время диффузно отраженное излучение лазеров этого класса безопасно как для кожи, так и для глаз;

- к третьему классу относят лазерные устройства, работающие в видимой области спектра и входное излучение которых представляет опасность при облучении как глаз (коллимированным и диффузно отраженным излучением на расстоянии менее 10 см от отражающей поверхности), так и кожи (только коллимированным пучком);

- к четвертому, наиболее опасному, классу относят лазерные устройства, даже диффузно отраженное излучение которых представляет опасность для глаз и кожи на расстоянии менее 10 см.

При определении класса опасности лазерного излучения учитываются три спектральных диапазона.

Диапазоны лазерного излучения

Таблица 4.1.

Класс опасности лазерного излучения	Диапазон		
	$180 < \lambda \leq 380$ нм	$380 < \lambda \leq 1400$ нм	$1400 < \lambda \leq 10^5$ нм
1	+	+	+
2	+	+	+
3	-	+	
4	+	+	+

4.2.4. Гигиеническое нормирование лазерного излучения

В соответствии со СНиП 5804-91 регламентируют ПДУ для каждого режима работы лазера и его спектрального диапазона. Нормируемыми параметрами с точки зрения опасности лазерного излучения являются энергия W и мощность P излучения, прошедшего ограничивающую апертуру диаметрами $d_a = 1.1\text{мм}$ (в спектральных диапазонах I и Д) и $d_a = 7\text{мм}$ (в диапазоне II); энергетическая экспозиция H и облученность E , усредненные по ограничивающей апертуре:

$$H = W/S_a, \quad (1.3)$$

$$E = P/S_a, \quad (1.2)$$

где S_a — площадь ограничивающей апертуры.

Предельные дозы при однократном воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения

Таблица 4.2.

Длина волны λ , нм	Длительность воздействия t ,	c
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2.3 * 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.3 * 10^{-11} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$8 * 10^{-8}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$5.9 * 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6.5 * 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6.5 * 10^{-11} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$1.6 * 10^{-7}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$1.2 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2.5 * 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.5 * 10^{-10} < t \leq 5 * 10^{-5}$	$4 * 10^{-7}$
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$3 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5 * 10^{-5}$	10^{-6}
	$5 * 10^{-5} < t \leq 1$	$7.4 * 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

Примечания: 1. Длительность воздействия меньше 1 с.

2. Ограничивающая апертура = $7 * 10^{-3}$ м.

ПДУ лазерного излучения устанавливают для двух условий - однократного и хронического облучения. Под хроническим понимают "систематически повторяющееся воздействие, которому подвергаются люди, профессионально связанные с лазерным излучением".

ПДУ при этом определяют как;

1) уровни лазерного излучения, при которых "существует незначительная вероятность возникновения обратимы отклонений в организме" человека;

2) уровни излучения, которые "при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводят к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья как самого работающего, так и последующих его поколений".

ПДУ хронического воздействия рассчитывают путем уменьшения в $5 \div 10$ раз ПДУ однократного воздействия.

4.3. Требования безопасности при эксплуатации оборудования ВОЛС

4.3.1. Требования безопасности к устройству и размещению оборудования ВОСП

1) В оборудовании ВОСП должны быть предусмотрены встроенные

меры безопасности в зависимости от уровня опасности ВОСП.

2) Если в оборудовании ВОСП произведены какие-либо изменения, которые могут повлиять на уровни опасности, то должна быть заново оценена степень опасности путем проведения испытаний и измерений,

3) Во всех системах, в которых есть доступ к кабельным соединителям, для их разъединения необходимо использовать специальные инструмент.

4) Оптические кабели должны иметь соответствующую маркировку, чтобы отличать их от кабелей другого назначения.

5) Перед работами на любом оптическом кабеле или системе персонал должен проверить режим работы системы и уровень его опасности. В случае если система смонтирована и включена, это должно быть обозначено маркировкой о соответствующем уровне опасности. Во время инсталляции, когда эти меры не могут еще быть обеспечены, при их отсутствии следует руководствоваться мерами предупреждения, соответствующими классификации испытательного оборудования, содержащего оптический источник, подсоединяемый к волокну.

6) При обнаружении оборванного (разрезанного) конца ВОЛС немедленно обмотать лентой ПХО во избежание подтекания компаунда, обламывания оптического волокна и обеспечения защиты от лазерного излучения. Запрещается подносить торец ВОК к лицу и непосредственно смотреть на любой торец волокна, по которому передается излучение.

7) При производстве работ на открытых волокнах, соединителях и т. д., оборудование оптической системы передачи или испытательное оборудование должно быть выключено (отсоединено) или находиться в состоянии передачи малой мощности. В этом случае непреднамеренное включение должно предотвращаться с помощью переключателя дистанционного управления или с помощью другого подходящего метода. Состояние линии (питание включено или выключено) должно быть четко обозначено.

8) При проведении измерений мощности оптического излучения на

выходе передающих устройств, присоединение измерителя мощности к оптическому соединителю передающего устройства производить при отключенном оптическом излучателе.

9) Замену блоков, отключение разъемов и осмотр монтажа необходимо производить при отключенном напряжении питания.

10) В оборудовании ВОСП и в специальных измерительных приборах излучатели должны быть закрыты заглушками, если к ним не подключены оптические кабели.

11) При уборке и утилизации отходов ВОК необходимо соблюдать осторожность. Не брать обломки оптического волокна голыми руками. Необходимо помнить, что смазанные компаундом кусочки ОВ далеко разносятся и могут вызвать раздражение рук, лица и дыхательных путей. При работе с ОВ, его отходы при разделке (сколе) необходимо собирать в отдельный контейнер, и после окончания монтажа освободить контейнер в отдельно отведенном месте или закопать отходы в грунт. Работу с ОВ следует проводить в клеенчатом фартуке. Следует избегать попадания остатков ОВ на одежду. Рабочее место и пол после разделки ОВ следует обработать пылесосом и затем протереть влажной салфеткой или мокрой тряпкой. Отжим тряпки следует производить в плотных резиновых перчатках.

12) Категорически запрещается принимать пищу в местах работы с ОВ.

13) При проведении работ, связанных со сваркой и монтажом оптического кабеля, необходимо исключить перемещение ВОК. Для обеспечения этого надо:

- не изменять положение ВОК;
- не перешагивать через ВОК, находящийся на небольшой высоте;
- не производить никаких работ в непосредственной близости от

ВОК, не обеспечив его защиту от возможных перемещений и повреждений.

13) Обеспечить противопожарную безопасность. Для этого не курить и не пользоваться открытым огнем на расстоянии менее 5 метров.

4.3.2. Требования к размещению лазерных изделий

Размещение лазерных изделий в каждом конкретном случае производится с учетом класса опасности изделий, условий и режима-труда персонала особенностей технологического процесса, подводка коммуникаций.

Требования для класса ЗБ:

1. Расстояние между лазерными изделиями должно обеспечивать безопасные условия труда и удобство эксплуатации, ремонта и обслуживания. Рекомендуется для класса ЗБ:

со стороны органов управления: при однорядном расположении-1,5 м;

- при двухрядном не менее - 2,0 м;

- с других сторон не менее - 1,0 м.

2. Траектория прохождения лазерного пучка должна быть заключена в материала или иметь ограждение, снижающие уровень лазерного излучения до ДПИ и исключающие попадание лазерного пучка на зеркальную поверхность. Открытые траектории в зоне возможного нахождения человека должны располагаться значительно выше уровня глаз. Минимальная высота траектории 2,2 м.

3. Рабочее место должно быть организовано такими образом, чтобы исключить возможность воздействия на персонал лазерного излучения или чтобы его величина не превышала ДПИ для первого класса.

4. Рабочее место обслуживающего персонала, взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации и другое.) должна обеспечивать рациональность рабочих движений и

максимально учитывать энергетические, скоростные, силовые и психофизические возможности человека.

5. Следует предусматривать наличие мест для размещения съемных деталей, переносной измерительной аппаратуры, хранения заготовок, готовых изделий.

4.3.3. Классификация условий и характера труда

По степени защиты персонала от воздействия лазерного излучения условия и характер труда при эксплуатации лазерных изделий независимо от класса изделия подразделяются:

- а) оптимальные - исключают воздействие на персонал лазерного излучения;
- б) допустимые - уровень лазерного излучения, воздействующего на персонал, меньше ПДУ установленного СНиП 5804;
- в) вредные и опасные - уровень лазерного излучения, воздействующего на персонал, превышает ПДУ.

4.3.4. Требования безопасности при эксплуатации и обслуживании лазерных изделий

Выполнение следующих требований безопасности должно обеспечивать исключение или максимальное уменьшение возможности облучения персонала лазерным излучением, а также воздействия на него других опасных факторов:

- к ремонту, наладке и испытаниям лазерных изделий допускаются лица, имеющие соответствующую квалификацию и прошедшие инструктаж по технике безопасности в установленном порядке.
- к работе с лазерными изделиями допускаются лица, достигшие восемнадцати лет, не имеющие медицинских противопоказаний,

прошедшие курс специального обучения в соответствии с ГОСТ 12.0.004, обучение в

установленном порядке работе с конкретными лазерными изделиями и аттестацию на группу по охране труда при работе на электроустановках с соответствующим напряжением.

- при эксплуатации изделий выше класса 2 должно назначаться лицо, ответственное за охрану труда при их эксплуатации.

- лазерные изделия, находящиеся в эксплуатации, должны подвергаться регулярной профилактической проверке. При проведении профилактической проверки следует обращать особое внимание на безотказность работы всех защитных устройств, надёжность заземления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследования, проделанной в данной выпускной квалификационной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Волоконно-оптические линии связи включают в себя оптические системы передачи (каналообразующие оборудования), волоконно-оптические кабели и регенерационные пункты.

2. Основными конструктивными элементами оптического кабеля являются оптическое волокно, оптические модули, оптические сердечники, силовые элементы, гидрофобные материалы, броня и оболочка.

3. Выбор длин регенерационных участков производится на основе энергетической мощности оборудования систем передачи и показателем затухания и дисперсии оптического волокна.

4. Полное затухание в волокне измеряется в дБ/км и определяется в виде суммы: собственные потери оптического волокна, которые состоит из потерь на поглощение и на рассеяние оптического излучения; кабельные потери и потери на погашение.

5. Дисперсия характеризуется тремя основными факторами:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия);
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия);
- свойствами материала оптического волокна (материальная дисперсия).

6. Дисперсия приводит к ограничению пропускной способности оптического волокна и снижению дальности передачи по ним.

7. В настоящее время известны следующие методы коррекции дисперсии:

- использование волокон с компенсирующей дисперсией DCF:

- использование оптических лазерных передатчиков с очень узкой спектральной шириной (0,1 нм и менее), способных модулировать излучение на частотах в несколько ГГц;

- использование волокон типа NZDSF.

8. При использовании волокон с компенсирующей дисперсией положительная дисперсия, накопленная на одном участке с использованием стандартного волокна SF, может компенсироваться последующим примыкающим сегментом на основе волокна DCF с заранее подобранным значением отрицательной дисперсии, в результате чего итоговая хроматическая дисперсия может быть приближена к нулю. Компенсация хроматической дисперсии допустима в силу систематического характера накопления дисперсии с ростом длины линии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. – 2-е изд., перераб. и доп./Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова - М.: ООО "Волоконно-оптическая техника", 2005. - 576 с.
2. Дмитриев А.Л. Оптические системы передачи информации / Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. -96 с.
3. Фриман Р. Волоконно–оптические системы связи: Перевод с английского под ред. Н.Н. Слепова.–М.: Техносфера, 2003. -590 с.
4. Дональд Дж. Стерлинг. Техническое руководство по волоконной оптике. Издательство «ЛОРИ», 1998. -280 с.
5. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно–оптические сети-М.:Эко–Трендз, 2000.-269 с.
6. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендс, 2001.-267 с
7. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: Учебное пособие для вузов. –М.: Горячая линия. Телеком, 2007. – 464 с.
8. Кемельбеков В.А., Мышкин В.Ф., Хан В.А. Оптические кабели связи. - Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 352 с.