

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

Рецензент

Допустить к защите
Руководитель направления

_____ А.Ю. Говенко

_____ Ю.Т. Карманов

“ ___ ” _____ 2017г.

“ ___ ” _____ 2017г.

**Особенность проектирования волоконно-оптической линии связи в условиях
плотной городской застройки**

*Направление 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы
связи»*

*магистерская программа «Системы мобильной связи»
ЮУрГУ – М 11.04.02.2017.458.00 ПЗ*

Научный руководитель:

_____ Д.В. Кривошеев

“ ___ ” _____ 2017г.

Магистрант:

студент группы КЭ-272

_____ А.А. Тарасенко

“ ___ ” _____ 2017г.

Нормоконтролер:

_____ В.Д. Спицына

“ ___ ” _____ 2017г.

Челябинск
2017

РЕФЕРАТ

Тарасенко А.А. Особенность проектирования волоконно-оптической линии связи в условиях плотной городской застройки. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭиКН, 2017, 52 с., 8 илл., 1 табл., библиогр. список – 25 наим.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линии связи, SDH, WDM, ВОК

Тема данной магистерской диссертации «Особенности проектирование волоконно-оптической линии связи в условиях плотной городской застройки». В данной работе рассматривается выбор типов оптического кабеля для строительства. Выбор расчёт участков регенерации и количества каналов для предоставления бесперебойной работы системы передачи.

Результаты данной выпускной квалификационной работы магистра и методы моделирования, примененные в ней, могут применяться в будущем, при проектировании волоконно-оптических линий связи.

					ЮУрГУ – М 11.04.02.2017.458.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Тарасенко А.А.			Особенности проектирования волоконно-оптических линий связи	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Кривошеев Д.В.					4	52
Н. кон.		Спицына В.Д.				ЮУрГУ Кафедра ИКТ		
УТВ.		Даровских С.Н.						

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. Основные принципы цифровой системы передачи данных	8
2. Выбор оборудования.....	24
2.1. Выбор кабеля.	24
2.2. Выбор муфты и кроссов.	30
3. Расчёт параметров световода	31
3.1. Определение пропускной способности ВОЛС	36
3.2. Расчет затухания световодов.....	37
3.3. Расчет дисперсии световодов.....	40
3.4. Расчет длины регенерационного участка	43
3.5. Расчет энергетического запаса.....	46
3.6. Определение отношения сигнал/шум или вероятности ошибки, отводимой на длину регенерационного участка.....	46
3.7. Определение уровня передачи мощности оптического излучения на выходе передающего оптического модуля (ПОМ)	46
3.8. Определение уровня мдм (порога чувствительности приемного оптического модуля – ПРОМ).....	47
3.9. Определение быстродействия системы	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	51

ВВЕДЕНИЕ

В современных сетях связи используются цифровые и аналоговые системы передачи с тенденцией постепенного перехода к применению только цифровых систем. Переход к цифровой передаче информации связан с повышенной помехоустойчивостью. Однако полный переход только на цифровую передачу информации займёт большой период времени. Но пока этого не произошло цифровые и аналоговые системы передачи должны быть совместимы.

Высокая стоимость линий связи обуславливает разработку систем и методов, позволяющих одновременно передавать по одной линии связи большое число независимых сообщений, т.е. использовать линию многократно. Такие системы связи называют многоканальными. Связь, осуществляемую с помощью этих систем, принято называть многоканальной. Большинство современных систем связи являются многоканальными. Волоконно-оптическими называют системы передачи, в которых в качестве среды распространения сигнала используется оптическое волокно.

Современные волоконно-оптические системы передачи обладают высокой скоростью передачи, широкой полосой передачи данных, надёжностью и стабильностью, высоким уровнем помехоустойчивостью, простотой реализации. Чтобы отвечать этим качествам, все их элементы должны функционировать в строгих технических рамках.

Для волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), как и для любой кабельной системы (на симметричных или коаксиальных кабелях), существуют общие параметры, измерять которые необходимо при строительстве, пусковых и сертификационных испытаниях, пуско-наладочных работах, а также в процессе эксплуатации при проведении профилактических работ. Вместе с тем ВОСП присущи существенные особенности, обусловленные тем, что носителем информации является поток фотонов.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и их особенности. Среди особенностей ВОЛС выделяются следующие:

- сверхвысокая пропускная способность, обусловленная работой в оптическом диапазоне радиоволн. по одному ов можно передавать информацию со скоростью порядка 10^{12-13} бит/с, что соответствует 15 млн. одновременных телефонных разговоров цифрового качества. на сегодняшний день полоса пропускания оптоволокна превышает все потребности существующих сетевых приложений;
- малое затухание сигнала, значения которого составляют от 0,18 до 0,22 дб/км на длине волны 1550 нм и от 0,31 до 0,34 дб/км на длине волны 1310 нм. в зависимости от скорости передачи это позволяет создавать линии с регенерационными участками (участок между активным оборудованием) более 100 км;
- высокая степень защищенности от прослушивания и невосприимчивость к электромагнитным помехам;
- малый вес и габариты кабелей (малый диаметр оптического волокна, малая удельная масса кварца, отсутствие экранов), легкость и компактность источников и приемников;
- низкая стоимость передачи информации, по сравнению со спутниковой связью.

Оптические волокна, применяемые в связи на средние и длинные дистанции, в основном состоят из материала, широко распространенного в природе, а потому более дешевого, чем медь.

Однако любое оптическое волокно обладает и рядом недостатков, такими как хрупкость, высокие требования при строительстве ВОЛС и монтаже коннекторов. Важнейшими характеристиками ОВ являются затухание и дисперсия. Затухание в оптическом волокне связано с собственными потерями волокна и так называемыми кабельными потерями, обусловленными деформациями в процессе изготовления. Составляющими собственных потерь ОВ являются: потери на поглощение в стекле и на примесях; потери рассеяния на микронеоднородностях материала и тепловых флуктуациях показателя преломления; рэлеевские потери.

1 Основные принципы цифровой системы передачи данных

Структура первичной сети предопределяет объединение и разделение потоков передаваемой информации, поэтому используемые на ней системы передачи строятся по иерархическому принципу. Применительно к цифровым системам этот принцип заключается в том, что число каналов цифровой системы передачи (далее – ЦСП), соответствующее данной ступени иерархии, больше числа каналов ЦСП предыдущей ступени в целое число раз.

Аналоговые системы передачи также строятся по иерархическому принципу, но в отличие от ЦСП для них ступенями иерархии являются не сами системы передачи, а типовые группы каналов. Цифровая система передачи, соответствующая первой ступени иерархии, называется первичной; на этой ступени осуществляется прямое преобразование относительно небольшого числа первичных сигналов в первичный цифровой поток. Системы передачи второй ступени иерархии объединяют определенное число первичных потоков во вторичный цифровой поток и т.д.

В рекомендациях МСЭ-Т представлено два типа иерархий ЦСП: синхронная цифровая иерархия SDH и плезиохронная цифровая иерархия PDH. Первичным сигналом для всех типов ЦСП является цифровой поток со скоростью передачи 64 кбит/с, называемым основным цифровым каналом (ОЦК). Для объединения сигналов ОЦК в групповые высокоскоростные цифровые сигналы используется принцип временного разделения каналов.

Новые телекоммуникационные технологии стали развиваться в связи с переходом от аналоговых к цифровым методам передачи данных, основанных на импульсно-кодовой модуляции (далее - ИКМ) и мультиплексировании с временным разделением каналов. В плезиохронной цифровой иерархии PDH мультиплексор сам выравнивает скорости входных потоков путем добавления нужного числа выравнивающих бит в каналы с меньшими скоростями передачи. Отсюда следовали недостатки PDH - невозможность вывода потока с меньшей

скоростью из потока с большей скоростью передачи без полного демультиплексирования этого потока и удаления выравнивающих бит. Недостатки PDH вызвали необходимость в разработке синхронной цифровой иерархии SDH, которая позволила вводить/выводить входные потоки без необходимости проводить их сборку/разборку и систематизировать иерархический ряд скоростей передачи.

Если представить систему передачи как некий конвейер, на который на одном конце один рабочий ставит коробки с книгами, а на другом конце второй рабочий эти коробки снимает. То для того что бы не было ни заторов ни простоев эти рабочие должны работать синхронно, то есть снимать и ставить коробки с одинаковой скоростью, и это требование в системах PDH выполняется. Но начальство решило увеличить производительность конвейера и увеличило его скорость в четыре раза, на работу этих двух рабочих это ни как не влияет, так как коробки с конвейера надо снимать с той же скоростью, с которой их туда ставят, но теперь на конвейере освободилось место. И начальство ставит еще трех рабочих в начале конвейера и трех в конце. Каждый из четырех рабочих на погрузке должен работать синхронно со своим партнером на выгрузке, и опять же с этим проблем нет. Но кроме этого рабочие при погрузке не должны мешать друг другу, они должны ставить коробки с одинаковой скоростью, то есть синхронно и вот с этим в системах PDH проблема. Решается эта проблема за счет выделения на конвейере дополнительного места, конвейер движется чуть быстрее, чем надо и у каждого рабочего на погрузке есть возможность работать, не сильно подстраиваясь под остальных рабочих выставляющих коробки на конвейер.

Как следствие выхватить в середине конвейера одну книгу из коробки или поставить книгу в коробку на определенное место невозможно, так как где это место в конкретный момент времени определить невозможно, надо ставить еще восемь рабочих, чтобы они снимали коробки, извлекали из одной из них книгу или ставили эту книгу на свободное место, а потом возвращали коробки на место. Еще одной проблемой систем PDH являлась не совместимость иерархий

разработанных в США, Японии и Европе. Но при разработке систем следующего поколения (SDH) от этих недостатков удалось избавиться, ну и как водиться увеличили скорость.

Кроме нулевого тайм слота (T0) в цикле есть еще один служебный канал, обычно он располагается на 16-ом месте (T16), чуть реже на последнем 31-ом (T31), некоторая аппаратура позволяет поставить его вообще на любое место, например аппаратура SHDSL может обрезать цикл (снижать скорость передачи, уменьшая количество передаваемых тайм слотов) в зависимости от параметров кабеля и что бы не обрезать служебный тайм слот его переносят в начало цикла. По этому тайм слоту передаются «Сигналы управления и взаимодействия» (СУВ), проще говоря по каналу идет обмен служебной информацией между АТС (протоколы DSS1, ОКС7 и т. д.), так же некоторые производители используют этот канал для дистанционного мониторинга мультиплексоров PDH.

Как работает сверхцикловая синхронизация легче всего объяснить на примере сигнализации 2ВСК (2 Выделенных Сигнальных Канала), на сегодняшний момент она довольно сильно устарела, и найти ее в реальной жизни довольно сложно, но она, зато довольно проста.

В 16-ом тайм слоте 1-го цикла (не нулевого) в первых четырех битах передается сигнальная информация (занятие канала, отбой, набор номера) для 1-го тайм слота цикла. В вторых четырех битах сигнальная информация для 17-го тайм слота.

В 16-ом тайм слоте 2-го цикла в первых четырех битах передается сигнальная информация для 2-го тайм слота цикла, в вторых четырех битах сигнальная информация для 18-го тайм слота и так далее.

В 16-ом тайм слоте 0-го цикла содержится информация для обеспечения сверхцикловой синхронизации, похоже на то, как в T0 передается информация о цикловой синхронизации.

При работе IP сети поверх потока E1 заголовки IP пакетов не перекладываются в отдельный тайм слот, а передаются вместе с полезной

информацией, поэтому при передаче данных используется неструктурированный поток E1: без сверхцикловой синхронизации, без тайм слота сигнализации, а под полезную нагрузку выделяется 31 тайм слот вместо 30.

Но система передачи, по которой передается поток E1, может пытаться отслеживать наличие сверхцикловой синхронизации и выдавать сообщение об аварии, в этом случае контроль сверхцикла можно просто отключить.

SDH — это стандарт для высокоскоростных высокопроизводительных оптических сетей связи более известный, как синхронная цифровая иерархия, это технология глобальной сети, пришедшая на смену импульсно-кодовой модуляции PCM (ИКМ) и плезиохронной цифровой иерархии PDH. Стандарт SDH определяет уровни скорости прохождения сигнала синхронного транспортного модуля (Synchronous Transport Module — STM). Основная скорость передачи сигнала составляет 155,520 Мбит/с.

Синхронная цифровая иерархия — это система передачи данных, основанная на синхронизации по времени передающего и принимающего устройства. Стандарты СЦИ определяют характеристики цифровых сигналов, включая структуру фреймов (циклов), метод мультиплексирования, иерархию цифровых скоростей и кодовые шаблоны интерфейсов и т. д.

SDH имеет следующие преимущества перед PDH :

- упрощение сети, вызванное возможностью вводить/выводить цифровые потоки без их сборки или разборки как в PDH;
- помехозащищенность - сеть использует волоконно-оптические кабели (ВОК), передача по которым практически не подвержена действию электромагнитных помех;
- выделение полосы пропускания по требованию-этот сервис теперь может быть предоставлен в считанные секунды путем переключения на другой (широкополосный) канал;
- прозрачность для передачи любого трафика-факт, обусловленный использованием виртуальных контейнеров для передачи трафика,

сформированного другими технологиями, включая самые современные технологии Frame Relay, ISDN и ATM;

- универсальность применения-технология используется для создания глобальных сетей или глобальной магистрали и для корпоративной сети, объединяющей десятки локальных сетей;

- простота наращивания мощности-при наличии универсальной стойки для размещения аппаратуры переход на следующую более высокую скорость иерархии можно осуществить просто, заменив группу функциональных блоков на новую (рассчитанную на большую скорость) группу блоков.

SDH позволяет организовать универсальную транспортную систему, охватывающую все участки сети и выполняющую функции как передачи информации, так и, управления и контроля. Она рассчитана на передачу всех сигналов PDH, а также всех действующих и перспективных служб, в том числе и широкополосной цифровой сети с интеграцией служб (ISDN), использующей асинхронный способ переноса (ATM).

Линейные сигналы SDH организованы в так называемые синхронные транспортные модули STM (Synchronous Transport Module). Первый из них - STM-1 - соответствует скорости передачи информации 155 Мбит/с. Каждый последующий имеет скорость в 4 раза большую, чем предыдущий, и образуется побайтным синхронным мультиплексированием. В настоящее время эксплуатируются или разрабатываются SDH системы со скоростями, соответствующими окончательной версии SDH иерархии: STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, STM-256 или 155,52, 622,08, 2488,32, 9953,28, 39813,12 Мбит/с. Три первых уровня (называемых по-старому первым, четвертым и шестнадцатым) были стандартизованы в последней версии ITU-T Rec. G.707.

Стандартизация интерфейсов определяет возможность соединения различного оборудования разных производителей. Система SDH обеспечивает универсальные стандарты для сетевых узловых интерфейсов, включая стандарты на уровне цифровых скоростей, структуру фрейма, метод мультиплексирования,

линейные интерфейсы, мониторинг и управление. Поэтому SDH оборудование разных производителей может легко соединяться и устанавливаться в одной линии, что наилучшим образом демонстрирует системную совместимость.

Система SDH обеспечивает стандартные уровни информационных структур, то есть набор стандартных скоростей. Базовый уровень скорости — STM-1 (155,52 Мбит/с). Цифровые скорости более высоких уровней определяются умножением скорости потока STM-1, соответственно, на 4, 16, 64 и т. д.: STM-4 (622 Мбит/с), STM-16 (2,5 Гбит/с), STM-64 (10 Гбит/с) и STM-256 (40 Гбит/с) (таблица 1).

Таблица 1 – Модули STM

Уровень	Модуль	Скорость передачи
1	STM-1	155,52 Мбит/с
4	STM-4	622,08 Мбит/с
16	STM-16	2488,32 Мбит/с
64	STM-64	9953,28 Мбит/с
256	STM-256	39813,12 Мбит/с

Мультиплексирование STM-1 в STM-N или STM-N в STM-4*N осуществляется непосредственно по следующей схеме: $4 \times STM - N \rightarrow STM - 4 \times N$. Увеличение скорости передачи приводит к уменьшению длительности импульсного сигнала. Т.к. при распространении по оптическим волокнам происходит «размывание» и «наплывание» импульсов друг на друга, при слишком длинной ВОЛС приемник излучения уже не может распознать отдельные импульсы. В результате усиливаются требования к ВОЛС по дисперсии, которая и определяет увеличение длительности.

Линейные (оптические) интерфейсы работают, используя универсальные стандарты. Линейный сигнал только скремблируется (англ. scrambled — шифровать, перемешивать), вставки избыточного кода нет.

Стандарт скремблирования — универсальный. Поэтому и на приеме, и на передаче должны использоваться стандартные скремблер и дескремблер. Цель скремблирования — сделать вероятность возникновения «1» бита и «0» бита близкой к 50 % для облегчения извлечения синхросигнала из линейного сигнала. Поскольку линейный сигнал только скремблируется, линейная скорость сигнала SDH соответствует стандартной скорости сигнала на электрическом интерфейсе SDH. Таким образом, потребление оптической мощности передающими лазерами остается неизменным, однако, снижается их тепловыделение (так как исключается возможность следования большого количества «1» подряд), что увеличивает их ресурс. Еще одной причиной по которой используется скремблирование — длительная последовательность «1» («0») автоматической петлей регулировки усиления воспринимается как увеличение (уменьшение) уровня входного сигнала, что может привести к неправильной регулировке.

В теории электросвязи существует несколько способов увеличения пропускной способности систем передачи информации. Большинство из них сводится к одному из методов уплотнения компонентных информационных потоков в один групповой, который передается по линии связи.

Поскольку низкоскоростные сигналы PDH мультиплексируются в структуру фрейма высокоскоростных сигналов SDH посредством метода побайтового мультиплексирования, их расположение во фрейме высокоскоростного сигнала фиксировано и определено или, скажем, предсказуемо. Поэтому низкоскоростной сигнал SDH, например 155 Мбит/с (STM-1) может быть напрямую добавлен или выделен из высокоскоростного сигнала, например 2.5 Гбит/с (STM-16). Это упрощает процесс мультиплексирования и демультиплексирования сигнала и

делает SDH иерархию особенно подходящей для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи, обладающих большой производительностью.

Поскольку принят метод синхронного мультиплексирования и гибкого отображения структуры, низкоскоростные сигналы PDH (например, 2Мбит/с) также могут быть мультиплексированы в сигнал SDH (STM-N). Их расположение во фрейме STM-N также предсказуемо. Поэтому низкоскоростной трибутарный сигнал (вплоть до сигнала DS-0, то есть одного тайм-слота PDH, 64 kbps) может быть напрямую добавлен или извлечен из сигнала STM-N. Заметьте, что это не одно и то же с вышеописанным процессом добавления/выделения низкоскоростного сигнала SDH в/из высокоскоростного сигнала SDH. Здесь это относится к прямому добавлению/выделению низкоскоростного трибутарного сигнала такого как 2Мбит/с, 34Мбит/с и 140Мбит/с в/из сигнала SDH. Это устраняет необходимость использования большого количества оборудования мультиплексирования / демультиплексирования (взаимосвязанного), повышает надежность и уменьшает вероятность ухудшения качества сигнала, снижает стоимость, потребление мощности и сложность оборудования. Добавление/выделение услуг в дальнейшем упрощается.

SDH имеет высокую совместимость. Это означает, что сеть передачи SDH и существующая сеть PDH могут работать совместно, пока идет установление сети передачи SDH. Сеть SDH может быть использована для передачи услуг PDH, а также сигналов других иерархий, таких как ATM, Ethernet и FDDI.

Базовый транспортный модуль (STM-1) может размещать и три типа сигналов PDH, и сигналы ATM, FDDI, DQDB. Это обуславливает двустороннюю совместимость и гарантирует бесперебойный переход от сети PDH к сети SDH и от SDH к ATM. Для размещения сигналов этих иерархий SDH мультиплексирует низкоскоростные сигналы различных иерархий в структуру фрейма STM-1 сигнала на границе сети (стартовая точка — точка ввода) и затем демультиплексирует их на границе сети (конечная точка — точка вывода). Таким образом цифровые сигналы различных иерархий могут быть переданы по сети передачи SDH.

Этот метод мультиплексирования помогает выполнять функцию цифровой кросс-коммутации (DXC) и обеспечивает сеть мощной функцией самовосстановления. Абонентов можно динамически соединять в соответствии с потребностями и выполнять отслеживание трафика в реальном времени.

Метод временного мультиплексирования (TDM)

В настоящее время метод временного уплотнения информационных потоков (TDM — Time Division Multiplexing) является наиболее распространенным. Он применяется при передаче информации в цифровом виде. Суть его состоит в следующем. Процесс передачи разбивается на ряд временных циклов, каждый из которых в свою очередь разбивается на N субциклов, где N — число уплотняемых каналов (или потоков). Каждый субцикл подразделяется на временные позиции, т.е. временные интервалы, в течение которых передается часть информации одного из цифровых мультиплексируемых потоков. Кроме того, некоторое число позиций отводится для идентификационных синхроимпульсов, вставок и цифрового потока служебной связи.

В своей первичной форме TDM используется для коммуникационных схем, использующих постоянное число каналов и постоянную пропускную способность в каждом из каналов.

Главное отличие мультиплексирования с разделением во времени от статистического мультиплексирования, такого как пакетное мультиплексирование, это то, что таймслоты в нем следуют в заданном, периодически повторяющемся порядке, в отличие от пакетной обработки (по мере поступления пакетов). Статистическое мультиплексирование похоже, но не должно быть рассматриваемо как мультиплексирование с подразделением времени.

В динамическом TDMAccess алгоритм планирования динамически резервирует переменное число временных интервалов для организации динамического изменения пропускной способности, основанным на требованиях к трафику каждого потока данных.

В сетях с коммутируемыми каналами связи, таких как, например, городские общественные телефонные сети, существует необходимость передавать одновременно множество звонков разных абонентов в одной среде передачи. Для реализации этой задачи можно использовать TDM. Стандартный голосовой сигнал(DS0) использует 64 кбит/с. TDM берет фреймы голосового сигнала и мультиплексирует их в TDM-фреймы, которые передаются с большей пропускной способностью. Таким образом, если TDM-фрейм содержит n голосовых фреймов, то пропускная способность будет $n*64$ кбит/с.

Каждый голосовой таймслот в TDM-фрейме называется каналом. В европейских системах TDM-фрейм состоит из 30-и цифровых голосовых каналов, в Американском стандарте их 22 (смотри E1 и T1). Оба эти стандарта включают в себя битовые таймслоты для сигнализации (см.: ОКС-7) и синхронизационные биты.

Мультиплексирование более чем 30-ти и 22-х цифровых голосовых канала называется мультиплексирование высшего порядка, который может быть достигнут посредством мультиплексирования стандартных TDM-фреймов. Например, европейский 120-канальный TDM-фрейм формируется с помощью мультиплексирования четырех 30-канальных TDM-фреймов. При каждом мультиплексировании более высокого порядка комбинируются четыре фрейма предыдущего порядка, созданных мультиплексированием $n*64$ кбит/с, где $n = 120, 480, 1920$ и т. д.

Метод временного уплотнения подразделяется на два вида — асинхронное или плезиохронное, временное мультиплексирование (PDH, ATM) и синхронное временное мультиплексирование (SDH). Современные технологии позволяют обеспечить скорость передачи группового сигнала 10 Гбит/с (STM-64). Несколько лет назад считалось, что это предел для электронных устройств мультиплексирования. Однако, благодаря развитию новых электронных технологий (полупроводниковые структуры на основе арсенида галлия, микровакуумных элементов) уже созданы лабораторные образцы электронных

мультиплексов для скорости 40 Гбит/с (STM-256), подготовленные для серийного промышленного производства. Научные исследования в этой области продолжаются с целью дальнейшего увеличения скорости передачи.

Метод частотного уплотнения (FDM)

При частотном методе мультиплексирования (FDM — Frequency Division Multiplexing) каждый информационный поток передается по физическому каналу на соответствующей частоте — поднесущей. Если в качестве физического канала выступает оптическое излучение — оптическая несущая, то она модулируется по интенсивности групповым информационным сигналом, спектр которого состоит из ряда частот поднесущих, количество которых равно числу компонентных информационных потоков. Частота поднесущей каждого канала выбирается исходя из условия, что частота поднесущей в 10 раз больше верхней частоты спектра информационного потока. Частотный интервал между поднесущими равен или больше верхней частоты спектра информационного потока.

В приёмнике оптическая несущая попадает на фотодетектор, на нагрузке которого выделяется электрический групповой поток, поступающий после усиления в широкополосном усилителе приема на входы узкополосных фильтров, центральная частота пропускания которых равна одной из поднесущих частот.

Разделение каналов осуществляется по частотам. Так как радиоканал обладает определённым спектром, то в сумме всех передающих устройств и получается современная радиосвязь. Например, ширина спектра сигнала для мобильного телефона составляет 8 МГц. Если мобильный оператор даёт абоненту частоту 880 МГц, то следующий абонент может занимать частоту $880+8=888$ МГц. Таким образом, если оператор мобильной связи имеет лицензионную частоту 800...900 МГц, то он способен обеспечить около 12 каналов, с частотным разделением.

Частотное разделение каналов применяется в технологии X-DSL. По телефонным проводам передаются сигналы различной частоты: телефонный разговор – 0,3...3,4 кГц а для передачи данных используется полоса от 28 до 1300 кГц.

Очень важно фильтровать сигналы. Иначе будут происходить наложения сигналов, из-за чего связь может сильно ухудшиться.

В качестве компонентных потоков могут выступать цифровые или аналоговые сигналы. В настоящее время в кабельных системах передачи частотное уплотнение применяется в многоканальном кабельном телевидении, где для этой цели отведен диапазон частот 47 ... 860 МГц, т.е. как метровый, так и дециметровый диапазоны ТВ.

Уплотнение по поляризации (PDM)

Уплотнение потоков информации с помощью оптических несущих, имеющих линейную поляризацию, называется уплотнением по поляризации (PDM — Polarization Division Multiplexing). При этом плоскость поляризации каждой несущей должна быть расположена под своим углом. Мультиплексирование осуществляется с помощью специальных оптических призм, например, призмы Рошона. Поляризационное мультиплексирование возможно только тогда, когда в среде передачи отсутствует оптическая анизотропия, т.е. волокно не должно иметь изгибов и локальных неоднородностей. Это одна из причин весьма ограниченного применения данного метода уплотнения. В частности, он применяется в оптических изоляторах, а также в оптических волоконных усилителях, которые используются в устройствах накачки эрбиевого волокна для сложения излучения накачки двух лазеров, излучение которых имеет выраженную поляризацию в виде вытянутого эллипса.

Многоволновое мультиплексирование оптических несущих (WDM)

Решение задачи дальнейшего роста пропускной способности волоконно-оптической системы передачи путем увеличения скорости передачи при помощи TDM ограничивается не только технологическими сложностями при электронном временном уплотнении, но и ограничениями, вызванными временной (хроматической) дисперсией оптических импульсов в процессе их распространения в ОВ. Это наглядно видно из сопоставления допустимых величин хроматической дисперсии для систем передачи STM-16 и STM-64 соответственно: 10500 пс/нм и 1600 пс/нм и поляризационной модовой дисперсии — 40 пс и 10 пс.

Указанная выше задача успешно решается с помощью оптического мультиплексирования с разделением по длинам волн — WDM (Wavelength Division Multiplexing). Суть этого метода состоит в том, что информационные цифровые потоки, переносимые каждый на своей оптической несущей на длине волны и разнесенны в пространстве, с помощью специальных устройств — оптических мультиплексоров (ОМ) — объединяются в один оптический поток, после чего он вводится в оптическое волокно. На приемной стороне производится обратная операция демультиплексирования.

В простейшем случае каждый лазерный передатчик генерирует сигнал на определенной частоте из частотного плана. Все эти сигналы перед тем, как вводятся в оптическое волокно, объединяются оптическим мультиплексором. На приемном конце сигналы аналогично разделяются оптическим демультиплексором. Здесь, так же как и в сетях SDH, мультиплексор является ключевым элементом. Сигналы могут приходить на длинах волн оборудования клиента, а передача происходит на длинах соответствующих частотному плану ITU DWDM. Преобразование длины волны происходит в оптическом транспондере.

Одним из основных параметров определения качества DWDM-сигнала в линии является отношение сигнала к шуму. Данный параметр, в соответствии с

МСЭ-Т О.201, входит в число первичных атрибутов оптических каналов и является первичной оценкой качества линии передачи.

Исторически первыми возникли двухволновые системы WDM, работающие на центральных длинах волн из второго и третьего окон прозрачности кварцевого волокна (1310 и 1550 нм). Главным достоинством таких систем является то, что из-за большого спектрального разнеса полностью отсутствует влияние каналов друг на друга. Этот способ позволяет либо удвоить скорость передачи по одному оптическому волокну, либо организовать дуплексную связь.

Современные системы WDM на основе стандартного частотного плана (рекомендация G.692 ITU-T) можно подразделить на три группы:

- грубые WDM (англ. coarse WDM, сокр. CWDM) — системы с частотным разнесом каналов более 2500 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 18 каналов. Используемые в настоящее время CWDM работают в полосе от 1271 нм до 1611 нм, промежуток между каналами 20 нм (2500 ГГц), можно мультиплексировать 16 спектральных каналов;
- плотные WDM (англ. dense WDM, сокр. DWDM) — системы с разнесом каналов около 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать до 40 каналов;
- высокоплотные WDM (англ. high dense WDM, сокр. HDWDM) — системы с разнесом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать более 64 каналов.

Частотный план для систем CWDM определяется стандартом ITU G.694.2. Область применения технологии — городские сети с расстоянием до 50 км. Достоинством этого вида WDM систем является низкая (по сравнению с остальными типами) стоимость оборудования вследствие меньших требований к компонентам.

Частотный план для систем DWDM определяется стандартом ITU G.694.1. Область применения — магистральные сети. Этот вид систем WDM предъявляет более высокие требования к компонентам, чем CWDM (ширина спектра источника

излучения, температурная стабилизация источника и т. д.). Толчок к бурному развитию сетей DWDM дало появление недорогих и эффективных волоконных эрбиевых усилителей (EDFA), работающих в промежутке от 1525 до 1565 нм (третье окно прозрачности кварцевого волокна).

Оптические параметры систем WDM регламентируются рекомендациями, в которых определены длины волн и оптические частоты для каждого канала. Согласно этим рекомендациям, мнговолновые системы передачи работают в 3-ем окне прозрачности ОВ, т.е. в диапазоне длин волн 1530...1565 нм. Для этого установлен стандарт длин волн, представляющий собой сетку оптических частот, в которой расписаны регламентированные значения оптических частот в диапазоне 196,1...192,1 ТГц с интервалами 100 ГГц и длины волн - 1528,77...1560,61 нм с интервалом 0,8 нм. Стандарт рассчитан на 41 спектральный канал, т.е. состоит из 41 длины волны. Но на практике используется 39 каналов из представленной сетки частот, поскольку два крайних находятся на склонах частотной характеристики оптических усилителей, применяемых в системах WDM.

В последнее время установилась тенденция увеличения количества спектральных каналов за счёт уменьшения частотного интервала между спектральными каналами до 50 ГГц и даже до 25 ГГц. Такое уплотнение получило название DWDM. Очевидно, что DWDM вызвано стремлением увеличить количество передаваемых каналов. Отметим также, что в настоящее время аббревиатура DWDM закрепились и для систем с мнговолновым уплотнением, у которых частотный интервал между каналами равен 100 ГГц.

В настоящее время в оборудовании систем связи с DWDM, рассчитанных для передачи до 32-х каналов, ряд фирм применяет длину волны 1510 нм, а некоторые — 1625 нм. Но с увеличением количества передаваемых каналов до 128 и более возникает необходимость освоения более длинноволновой части оптического спектра, в частности L-диапазона (или 4-е окно прозрачности ОВ), в который будет входить длина волны 1625 нм.

Создание систем передачи DWDM потребовало разработки целого ряда как активных, так и пассивных квантовых и оптических элементов и устройств с высокостабильными параметрами. Сюда относятся полупроводниковые лазеры с узкой спектральной шириной линии излучения (менее 0,05 нм) при стабильности не хуже $\pm 0,04$ нм. Волоконно-оптические усилители должны иметь стабильный коэффициент усиления, малую неравномерность коэффициента усиления, ($\pm 0,5$ дБ) во всем спектральном диапазоне усиления и ряд других характеристик. Среди пассивных элементов наиболее ответственными являются оптические мультиплексоры/демультиплексоры для большого количества каналов при работе в одном окне прозрачности (1530...1565 нм). Расстройка по длине волны этих элементов не должна превышать 0,05 нм. Такая стабильность обеспечивается жесткой температурной стабилизацией этих элементов с точностью не хуже ± 1 °С. Все это резко повышает стоимость систем DWDM.

2 Выбор оборудования

2.1 Выбор кабеля

Основным элементом волоконно-оптического кабеля (ВОК) является оптический волновод – круглый стержень из оптически прозрачного диэлектрика. Оптические волноводы из-за малых размеров поперечного сечения обычно называют оптическими волокнами (ОВ).

Оптическое волокно состоит из сердцевины (ядра), по которой распространяются световые волны, и оболочки. Сердцевина служит для передачи световых волн. Назначение оболочки – создание лучших условий отражения на границе «сердцевина-оболочка» и защита от излучения энергии в окружающее пространство. По этой причине показатель преломления оболочки выше показателя преломления сердцевины.

В общем случае в ОВ могут распространяться три типа волн: излучаемые, вытекающие и направляемые. Действие и преобладание какого-либо типа волн связаны в первую очередь с углом падения волны на границу «сердцевина-оболочка» ОВ. При определенных углах падения лучей на торец ОВ имеет место явление полного внутреннего отражения на границе «сердцевина-оболочка» ОВ. Из-за разного коэффициента отражения в сердцевине и оболочки световое излучение как бы запирается в сердцевине и распространяется только в ней.

Вытекающие и излучаемые волны – это паразитные волны, приводящие к рассеянию энергии и искажению информационного сигнала.

Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber). В многомодовых ОВ, имеющих диаметр светонесущей жилы на порядок больше длины волны передачи, распространяется множество различных типов световых лучей - мод. Многомодовые волокна разделяются по профилю показателя преломления на градиентные (graded index multi mode fiber) и ступенчатые (step index multi mode fiber). При многомодовом режиме распространения излучения по ОВ условие

полного внутреннего отражения выполняются для бесконечного множества лучей. Это возможно только для ОВ, у которых сердцевины много больше, чем длины распространяемых волн. Такие оптические волокна называются многомодовые.

В одномодовых ОВ (Рисунок 1) в отличие от многомодовых (Рисунок 2, 3) распространяется только один луч, и, следовательно, искажение сигнала, вызванные разным временем распространения различных лучей, отсутствуют.



Рисунок 1 – Одномодовое волокно

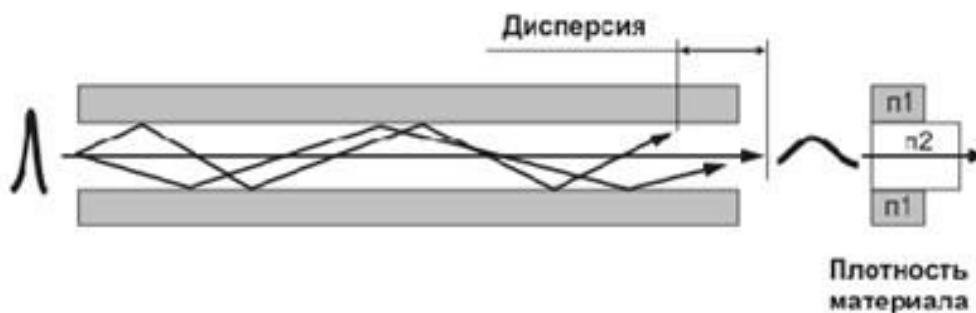


Рисунок 2 – Многомодовое волокно со ступенчатым коэффициентом

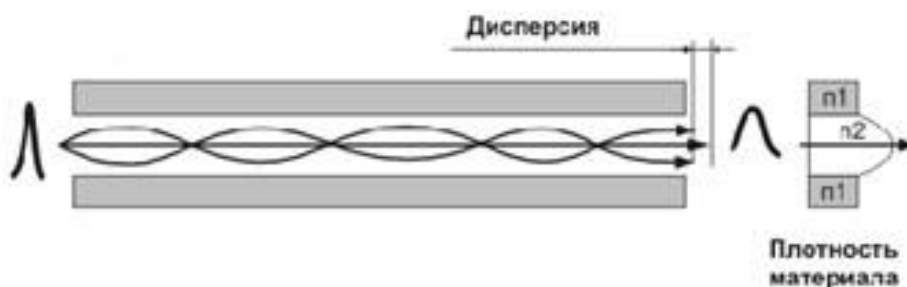


Рисунок 3 – Многомодовое волокно с градиентным коэффициентом

Многомодовое волокно в основном используется для удлинения ранее построенных на их основе сетей и для строительства разветвлённых типов волоконно-оптических линий связи, например в условиях плотной городской застройки, на магистральных участках сети местной связи и линиях передачи данных, имеет относительно (с одномодовым волокном) больший коэффициент

затухания ($\approx 0,7$ дБ/км), а также длина регенерационного участка у многомодового волокна гораздо меньше, чем у одномодового, и в среднем составляет от семи до десяти км. Одномодовое волокно используется на магистральных оптических линиях связи, например между населёнными пунктами. Из-за низкого коэффициента затухания и отсутствия хроматической дисперсии длина участка регенерации может достигать более 100 км.

По видам конструкций различают кабели пучковой скрутки, повивной, кабели с профильным сердечником, а также ленточные кабели. Существуют многочисленные комбинации конструкций ВОК, которые в сочетании с большим ассортиментом применяемых материалов позволяют выбрать исполнение кабеля, наилучшим образом удовлетворяющее всем условиям проекта, в том числе – стоимостным.

В зависимости от типа монтажа оптический кабель бывает следующих видов:

- а) кабель для укладки в канализацию;
- б) кабель для укладки в грунт;
 - 1) кабель для укладки в трубах;
- в) самонесущий кабель;
 - 1) кабель с выносным силовым элементом;
 - 2) кабель с грозотросом;
- г) распределительный.

Рассмотри области применения данных типов ВОК.

Кабель для укладки в канализацию применяется в кабельной канализации, лотках, блоках, тоннелях, коллекторах при опасности повреждения грызунами. Кабель допускается для прокладки в грунты 1—3 групп (если на кабель отсутствуют механические воздействия грунта превышающие допустимые значения), для прокладки по мостам, эстакадам.

Кабель для укладки в грунт применяется при наличии особо высоких требований по механической устойчивости: в грунтах всех групп, в

болотах,

неглубоких несудоходных реках. Допускается для прокладки в кабельную канализацию, в лотках, блоках, тоннелях, коллекторах допускается подвешивать между зданиями и опорами, однако при расчетах необходимо учитывать его большой вес и диаметр относительно самонесущих кабелей.

Кабель для укладки в трубах применяется для задувки в ЗПТ (защитные полиэтиленовые трубы), а также в кабельной канализации, лотках, блоках, тоннелях, коллекторах (при отсутствии угрозы повреждения грызунами). Допускается для подвеса на опорах линий связи, линий электропередач, контактной сети железных дорог.

Самонесущий кабель применяется для подвеса на опорах линий связи, линий электропередач, контактной сети железных дорог, в том числе, при особо высоких требованиях по устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям. Допускается прокладка внутри зданий, в кабельной канализации, трубах, лотках, блоках, тоннелях, коллекторах, по мостам и эстакадам — при незначительной угрозе повреждения грызунами, либо в специальной защитной трубе, внутри зданий, и в грунте в специальной защитной полиэтиленовой трубе.

Кабель с выносным силовым элементом применяется для подвеса на опорах линии связи, столбах освещения, между зданиями и сооружениями. В диэлектрическом исполнении допускается подвес на линиях электропередач и энергообъектах.

Кабель с грозотросом применяется для организации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше.

Распределительный кабель применяется для прокладки внутри здания и помещения, в кабельных лотках, в кабельных каналах, кабельной канализации, трубах, блоках. Для наружной прокладки по внешним фасадам здания, а также для изготовления оптических шнуров.

Оптическое волокно состоит из ядра, по которой происходит распространение световых волн, и оболочки, предназначенной, с одной стороны, для создания лучших условий отражения на границе раздела «сердцевина —

оболочка», а с другой - для препятствия излучения энергии в окружающее пространство. С целью повышения прочности и тем самым надежности волокна поверх оболочки, как правило, накладываются защитные упрочняющие покрытия. Такая конструкция ОВ используется в большинстве оптических кабелей (ОК) в качестве базовой. Сердцевина изготавливается из оптически более плотного материала. Оптические волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины, т.е. зависимостью показателя преломления от расстояния от оси ОВ.

Так как в данной работе рассматривается проектирование ВОЛС в условиях плотной городской застройки, то для прокладки кабеля использовалась канализация ГТС и опоры ВЛ до 10 кВ. Исходя из требований по монтажу выбираем канализационный кабель марки ДОЛ, подвесной самонесущий кабель марки ДПТ и распределительный кабель марки ОБВ производства ООО «Инкаб». Рассмотрим характеристики этих оптических кабелей.

На рисунке 4 и в таблице 1 представлены технические характеристики и конструкция кабеля ДОЛ.

1 – центральный силовой элемент – стеклопластиковый диэлектрический стержень.

2 – оптическое волокно.

3 – оптический модуль, заполненный гидрофобным гелем.

4 – межмодульный гидрофобный гель.

5 – водоблокирующие нити.

6 – промежуточная оболочка из полимерного материала.

7 – броня из стальной гофрированной ленты.

8 – оболочка из полимерного материала.

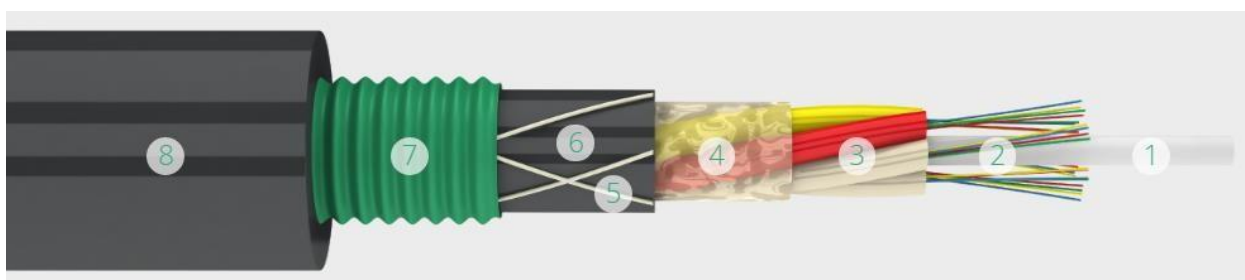


Рисунок 4 – Конструкция кабеля ДОЛ

Таблица 2 – Технические характеристики оптического кабеля ДОЛ

Количество ОВ в кабеле	48	72	96	144
Количество оптических модулей	6	6	6	6
Количество ОВ в модуле	8	12	16	24
Диаметр кабеля, мм	12,6	12,9	14,0	14,9
Вес кабеля, кг/км	140,9	145,0	168,9	189,5
Радиус изгиба, мм	189	193	210	223

Допустимая раздавливающая нагрузка — от 300 Н/см.
Допустимая растягивающая нагрузка — 2,7 кН.

На рисунке 5 и в таблице 2 представлены технические характеристики и конструкция ОБВ.

1 – оптическое волокно.

2 – буферное покрытие.

3 –стеклопластиковые прутки.

4 –безгалогенная оболочка, не распространяющая горение.

5 – риски, указание мест вскрытия кабеля.



Рисунок 5 – Конструкция кабеля ОБВ

Таблица 3 – Технические характеристики оптического кабеля ОБВ

Количество ОВ в кабеле	4	12	24	36	48
Диаметр кабеля, мм	6,5	8,5	10,5	13,5	13,5
Вес кабеля, кг/км	42	64	91	148	160
Радиус изгиба, мм	65	85	105	135	135

Допустимая раздавливающая нагрузка — от 80 до 200 Н/см.
Допустимая растягивающая нагрузка — 0,4 кН.

На рисунке 6 и в таблице 2 представлены технические характеристики и конструкция кабеля ДПТ.

1 – центральный силовой элемент – стеклопластиковый диэлектрический стержень.

2 – оптическое волокно.

3 – оптический модуль, заполненный гидрофобным гелем.

- 4 – межмодульный гидрофобный гель.
- 5 – промежуточная оболочка из полимерного материала.
- 6 – упрочняющие элементы – арматурные нити.
- 7 – оболочка из полимерного материала.

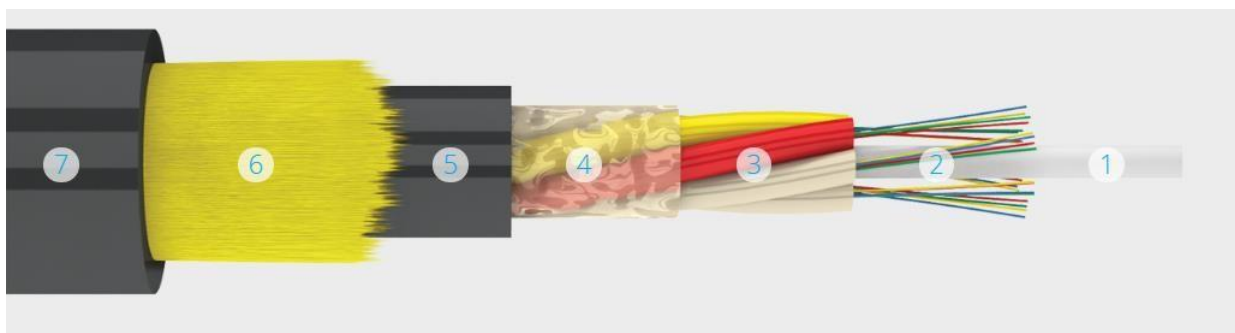


Рисунок 5 – Конструкция кабеля ДПТ

Таблица 4 – Технические характеристики оптического кабеля ДПТ с допустимой растягивающей нагрузкой 6 кН

Количество ОВ в кабеле	48	72	96	144
Количество оптических модулей	6	6	6	6
Количество ОВ в модуле	8	12	16	24
Диаметр кабеля, мм	12,2	12,8	13,5	14,1
Вес кабеля, кг/км	113,8	124,4	135,6	146,2
Радиус изгиба, мм	183	192	203	212

Допустимая раздавливающая нагрузка — от 300 Н/см.
Допустимая растягивающая нагрузка — от 4 до 60 кН.

2.2 Выбор муфт

Оптические муфты Fujikura предназначены для проходного и разветвительного сращивания любых типов оптических кабелей при прокладке в грунте, кабельной канализации, коллекторах, тоннелях, а также для подвески на опорах воздушных линий связи и электропередач. Модельный ряд оптических муфт Fujikura содержит полный спектр современных конструкций и типов муфт для самых разнообразных применений. Муфты обеспечивают надежную защиту и герметизацию места соединения оптических кабелей и отвечают самым высоким требованиям качества и надежности.

Муфты Fujikura (рисунок 6) поставляются с руководством по монтажу на русском языке и имеют сертификат соответствия в системе сертификации «Связь».

Основные характеристики:

- емкость от 48 до 180 волокон;
- конструкция обеспечивает полную водо- и воздухонепроницаемость, позволяет осуществлять разборку и повторный монтаж муфты;
- корпуса муфт изготовлены из высокопрочного пластика, стойкого к воздействию солнечной радиации;
- металлические конструкции и крепежные элементы муфт имеют антикоррозионное покрытие;
- температурный диапазон эксплуатации от минус 60 до плюс 60 С.



Рисунок 6 – Муфта

По мере распространения оптического сигнала происходит его ослабление, а также уширение импульсов из-за дисперсии. Если максимально допустимая длина между приемником и передатчиком превышена, то необходимо в промежуточных точках линии связи добавлять один или несколько ретрансляторов. В общем случае ретранслятор выполняет функцию усилителя оптического сигнала, и дополнительно (при цифровой передаче) может восстанавливать форму импульсов, уменьшать уровень шумов и устранять ошибки. Такой ретранслятор является регенератором.

По методу усиления оптического сигнала ретрансляторы подразделяются на две категории: повторители и оптические усилители (ОУ), которые мы и будем использовать.

Для монтажа ВОК связи при ремонте используют муфты соединительного и разветвительного типа.

Для монтажа ВОК связи, проложенного в ПЭВП кабелеводе, используют муфты, преимущественно, тупикового типа.

Конструкция и параметры муфт, используемых для ремонта ВОК связи должны обеспечивать:

- соответствие муфты условиям ее применения;
- соединение всех волокон кабеля в заранее определенном порядке;
- среднее затухание сростка на усилительном участке – не более 0,05 дБ;

- восстановление целостности оболочки кабеля;
- непрерывность механических параметров кабеля;
- герметичность соединения;
- возможность перемонтажа муфты и повторного соединения волокон.

Монтаж муфт при ремонте ВОК связи, как правило, проводят в специально оборудованной монтажно-измерительной лаборатории. Допускается проведение монтажа при ремонте ВОК в колодце кабельной канализации или в установленной возле котлована палатке. Рабочее место для монтажа должно быть, сухим, иметь достаточное освещение и вентиляцию и обеспечивать возможность размещения в нем рабочего стола для сварочного устройства и работу двух монтажников ВОЛС. При монтаже оптических муфт должен быть предусмотрен технологический запас кабеля, который обеспечивает возможность подачи муфты на рабочий стол монтажника ВОЛС.

Длина технологического запаса (с каждой стороны) при монтаже муфт ВОК связи должна быть не менее:

а) ВОК проложен в ПЭВП кабелеводе:

- 1) при монтаже в монтажно-измерительной лаборатории и колодце – 12 м;

б) ВОК проложен непосредственно в грунт или кабельную канализацию:

- 1) при монтаже в колодце (палатке у котлована) – 5 м;
- 2) при монтаже в монтажно-измерительной лаборатории – 10 м;

в) ВОК подвешен на опорах вдольтрассовой ВЛ – 30 м.

Концы сращиваемых ВОК связи подают на рабочий стол монтажника, разделяют их и выполняют монтаж.

Монтаж оптических муфт выполняют в строгом соответствии с требованиями ТУ на муфту, технологической карты монтажа, а также «Инструкции по проектированию и строительству ВОЛС газопроводов. ВСН 51–1.15–004–97»

При монтаже муфты не допускается превышать механические параметры кабеля и волокон, заданных фирмой-изготовителем.

Сращивание волокон ВОК связи следует производить электросваркой. Среднее значение вносимого затухания в сварном шве должно быть не более 0,05 дБ на волокно. В процессе монтажа оптической муфты производят контрольные измерения затухания оптических волокон. Все измерения заносят в паспорт на смонтированную муфту оптического кабеля.

Монтаж соединительных муфт, в зависимости от их конструкции и типа может быть проведен следующими методами:

- «холодного» монтажа с использованием заливочных компаундов, пасты, клея;
- герметичного механического соединения;
- «горячего» монтажа: сваривания полиэтиленовых муфт методом инъекции полиэтилена, использования термоусаживаемых материалов с адгезивным подслоем и др.

При необходимости муфту проверяют под местным давлением. Конструкция и материал корпуса муфт обеспечивают возможность приварки к корпусу временного полиэтиленового вентиля. По предварительному заказу муфты на заводе-изготовителе могут быть оснащены временными или постоянными вентилями.

Воздух в муфту закачивают автомобильным насосом через осушительный бачок с силикагелем. Для проверки путем подкачки поддерживают в муфте постоянное давление, равное примерно 0,1 МПа (1 кгс/см²). Проверку муфты на герметичность производят, покрывая ее мыльной пеной, или с помощью прибора УЗТИ. После проверки муфту тщательно промывают водой, удаляя остатки мыла, и затем протирают сухой ветошью. Временные вентили удаляют. Муфту герметизируют.

Размещаться (в котловане, колодце, смотровом устройстве) муфта должна таким образом, чтобы не ухудшать электрические и механические характеристики кабеля. Должна быть предусмотрена защита муфты от механических и климатических воздействий.

3 Расчет параметров световода

3.1 Определение пропускной способности ВОЛС

Предельный объем информации, который можно передать по волокну единичной длины, определяется его полосой пропускания. Полоса пропускания оптического волокна зависит от дисперсии, чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну.

Дисперсия – уширение импульсов – рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Физическим смыслом дисперсии является увеличение длительности импульса. Полоса пропускания оптического кабеля измеряется в (Гц·км) и определяется:

$$W = 0,44/\tau , \quad (1)$$

где τ – результирующая дисперсия оптического волокна, с/км, определяется по формуле:

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 , \quad (2)$$

где τ_{mod} – межмодовая дисперсия, обусловленная различием скоростей распространения направляемых мод;

τ_{chr} – хроматическая (частотная) дисперсия, обусловленная некогерентностью источника излучения и зависимостью от длины волны показателя преломления волокна и коэффициента распространения моды.

В многомодовых оптических волокнах определяющей является межмодовая дисперсия, в одномодовых присутствует только хроматическая дисперсия.

Для одномодового оптического волокна пользуются значением дисперсии, нормированным на нанометр ширины спектра источника и километр длины волокна, которое называют удельной хроматической дисперсией.

Удельная дисперсия измеряется в пс/(нм·км). Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией соотношением:

$$\tau_{\text{chr}}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (3)$$

где $D(\lambda)$ – удельная хроматическая дисперсия, с/(нм·км);

$\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника (нм).

Оптический интерфейс SDH использует кодировку 8B/10 В, что соответствует частоте модуляции 778 МГц. При использовании лазера с $\Delta\lambda=0,1$ нм удельная полоса пропускания для многомодового волокна составит $12600 \cdot 20=252000$ МГц·км и при длине оптического сегмента 200 км будет равна $252000/200 = 1260$ МГц, что значительно больше 778 МГц. То есть с точки зрения дисперсии при использовании лазера с $\Delta\lambda = 0,1$ нм протяженность в 200 км является допустимой.

3.2. Расчет затухания световодов

Важнейшим параметром в любой системе передачи сигнала является помехоустойчивость и затухание передаваемой энергии. ВОЛС не являются исключением. Для заданных значений скорости передачи информации и вероятности ошибки мощность на входе фотодетектора должна быть не ниже минимально-допустимой. Потери наряду с дисперсией определяют длину участка регенерации волоконно-оптической линии связи, т.е. расстояние между активным оборудованием, например, усилители, мультиплексоры. Существуют две главные причины собственных потерь в световодах: поглощение и рассеяние энергии.

Затухание поглощения, α_n связанное с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой и существенно зависит от свойств материала световода $\text{tg}\delta$.

Расчет затухания поглощения:

а) Для длины волны 1310 нм

$$\alpha \approx \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot \text{tg} \delta \cdot 8,69 \cdot 10^3 = \frac{3,14 \cdot 1,487}{1,31 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-11} \cdot 8,69 \cdot 10^3 = 0,305 \text{ дБ/км,} \quad (4)$$

б) Для длины волны 1550 нм

$$\alpha \approx \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot \text{tg} \delta \cdot 8,69 \cdot 10^3 = \frac{3,14 \cdot 1,487}{1,55 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-11} \cdot 8,69 \cdot 10^3 = 0,262 \text{ дБ/км,} \quad (5)$$

где λ – длина волны;

$\text{tg} \delta = 10^{-11}$ – тангенс угла диэлектрических потерь в световоде;

n_1 – коэффициент преломления.

Коэффициент преломления и тангенс диэлектрических потерь зависят от длины волны и качества волоконно-оптического кабеля, в связи с чем не могут быть заданы постоянными величинами при расчете.

Потери на рассеяние определяют нижний предел потерь, присущих волоконным световодам. Потери с увеличением длины волны уменьшаются. Рассеяние обусловлено неоднородностями материала волоконного световода, размеры которых меньше длины волны, а также тепловой флуктуацией преломления.

Различают линейное и нелинейное рассеяние. При линейном рассеянии его мощность пропорциональна мощности падающей волны. В этом случае происходит частичное изменение потока энергии. Нелинейные потери связаны с качеством сварки оптических волокон в муфтах и кроссах.

Потери на рассеяние, возникающие в результате флуктуации показателя преломления, называются рэлеевскими и определяются по формуле:

а) Для длины волны 1310 нм

$$\alpha_p = \frac{R_p}{\lambda^4} = \frac{0,8}{1,31^4} = 0,256 \text{ дБ/км,} \quad (6)$$

б) Для длины волны 1550 нм

$$\alpha_p = \frac{R_p}{\lambda^4} = \frac{0,8}{1,55^4} = 0,139 \text{ дБ/км}, \quad (7)$$

где λ - длина волны

R_p – коэффициент рассеяния, равный для кварца многомодового световода 0,8 дБ/км·мкм⁴.

Суммарное значение собственного затухания оптического волокна в общем случае

а) Для длины волны 1310 нм

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{нк} + \alpha_{пр} = 0,305 + 0,256 + 0,1 = 0,661 \text{ дБ/км}, \quad (8)$$

б) Для длины волны 1550 нм

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{нк} + \alpha_{пр} = 0,262 + 0,139 + 0,1 = 0,501 \text{ дБ/км}, \quad (9)$$

где $\alpha_{нк}$ – коэффициент затухания в инфракрасной области, расположенной в диапазоне длин волн свыше 1.6 мкм (для заданных длин волн не рассчитывается);

$\alpha_{пр}$ – коэффициент затухания из-за наличия в материале волоконного световода посторонних примесей для многомодового световода приблизительно равен 0,1 дБ/км.

После расчета собственного затухания световода α_c полученное значение необходимо сравнить с его верхней границей, указанной в маркировке кабеля и в дальнейших расчетах использовать наибольшее из них. Так как 0,682 (для 1310) гораздо больше 0,34, то будем в дальнейших расчетах принимать значение равное 0,682. Аналогично, так как 0,501 (для 1,55) гораздо больше 0,2, можно в дальнейших расчетах принимать значение 0,501, но логичнее выбрать длину волны 1310 нм (Рисунок 7).

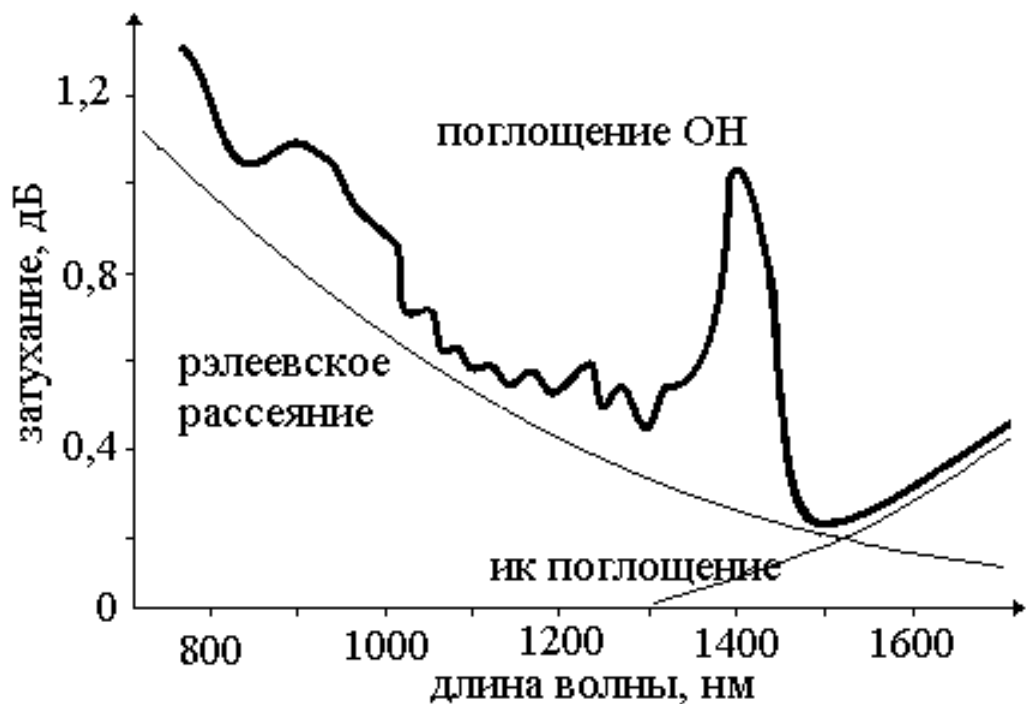


Рисунок 7 – Зависимость затухания от длины волны

Кроме собственных потерь α_c следует учитывать также дополнительные кабельные потери α_k . Они связаны с непостоянством размеров поперечного сечения волокна, наличием макро- и микроизгибов из-за скрутки, конструктивных и технологических неоднородностей и других причин. Установлено, что все кабельные потери существенно увеличивают затухание.

Приближенно можно рассчитать:

$$\alpha_k = \alpha_{zv} + \frac{A_m}{l_{стр}} = 0,15 \cdot 0,0682 + \frac{0,3}{4} = 0,1773 \text{ дБ/км}, \quad (10)$$

где α_{zv} – дополнительное затухание за счет геометрии волокна равно $\alpha_c \cdot 0,15$;
 A_m – потери на стыке оптических волокон в муфте равные от 0 до 0,3 дБ, для расчётов взято максимально-допустимое значение;

$l_{стр}$ – протяженность строительной длины оптического кабеля, км.

3.3 Расчет дисперсии световодов

В световоде при передаче импульсных сигналов (отличающихся друг от друга различной мощностью) после прохождения ими некоторого расстояния

световые импульсы искажаются и расширяются во времени, т.е. время подачи одного импульса увеличивается. В результате наступает такой момент, когда соседние импульсы начинают перекрывать друг друга. Данное явление в теории световодов называют дисперсией.

Расширение импульсов устанавливает предельные скорости передачи информации по световоду при импульсно-кодовой модуляции и при малых потерях ограничивает длину ретрансляционного участка. Дисперсия ограничивает пропускную способность ВОЛС, которая предопределяет полосу частот ΔF , пропускаемую световодом, ширину линейного тракта и соответственно объем информации, который можно передать по оптическому кабелю. Уширение определяется как квадратичная разность длительности импульсов на выходе и входе кабеля:

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2} \text{ нс/км}, \quad (11)$$

Причем, значения $t_{\text{вых}}^2$ и $t_{\text{вх}}^2$ берутся на уровне половины амплитуды импульсов.

Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон использования световодов, она существенно снижает дальность передачи по оптическому кабелю, т.к. чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса. Дисперсия возникает по двум причинам: некогерентность источников излучения и появление спектра $\Delta\lambda$, существование большого числа мод N . Первая называется хроматической (частотной) дисперсией, которая делится на материальную и волновую. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента преломления материала световода от длины волны. Волновая дисперсия обусловлена процессами внутри моды и связана со световодной структурой моды. Она характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны. Модовая дисперсия объясняется наличием

большого числа мод, каждая из которых распространяется со своей скоростью. Для многомодового волокна дисперсия равна:

$$\tau = \tau_{\text{хром}} \cdot \Delta\lambda = 3,5 \cdot 2 = 7 \text{ пс/км}, \quad (12)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина полосы оптического излучения, определяемая из справочных данных соответствующего источника излучения (2 нм)

Дисперсия проявляется по-разному в различных типах волоконных световодов. Сравнивая дисперсионные характеристики световодов, можно отметить, что лучшими параметрами обладают одномодовые световода. Хорошие данные также у градиентных световодов с плавным изменением показателей преломления. Наиболее резко дисперсия проявляется у ступенчатых многомодовых световодов.

Результирующая дисперсия складывается из волноводной и материальной и называется хроматической дисперсией (рисунок 8). Дисперсию в оптических волокнах принято характеризовать коэффициентом дисперсии или удельной дисперсией, измеряемом в пс/(нм·км). Коэффициент дисперсии численно равен увеличению длительности светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения отрезка ОВ длиной 1 км. Значение коэффициента хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км).

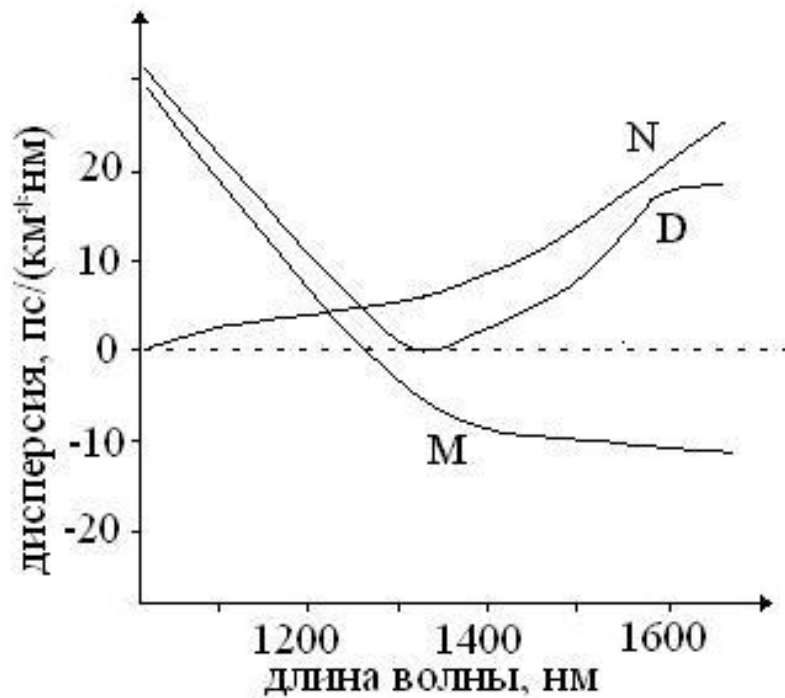


Рисунок 8 – Зависимость дисперсии от длины волны

3.4 Расчет длины регенерационного участка

Длина регенерационного участка $L_{р.у.}$ ВОЛС определяется передаточными характеристиками кабеля: его коэффициентом затухания α и дисперсией τ .

Затухание кабеля приводит к уменьшению передаваемой мощности, что соответственно лимитирует длину регенерационного участка. Дисперсия кабеля приводит к наложению передаваемых импульсов и как следствие к их искажению, и чем длиннее линия, тем больше вносимые искажения импульсов, что в свою очередь, также накладывает ограничения на пропускную способность кабеля ΔF .

Длина регенерационного участка должна удовлетворять значениям как затухания, так и дисперсии. Поэтому производится расчет длины регенерационного участка сначала исходя из допустимого значения по затуханию $L_{р.у.}^z$, затем исходя из требуемых значений дисперсии и пропускной способности $L_{р.у.}^d$. Из полученных двух значений $L_{р.у.}^z$ и $L_{р.у.}^d$ длин регенерационного участка выбирается наименьшее значение как отвечающее условиям затухания и дисперсии.

Оптические кабели характеризуются двумя важнейшими параметрами – затуханием и дисперсией.

Затухание оптического волокна характеризует уменьшение мощности оптического излучения при прохождении по ОВ, поэтому эта величина определяет длину регенерационных участков (расстояние между усилителями).

Дисперсия характеризует искажение передаваемого сигнала. Сигнал изменяется путем наложения различных мод, чем длиннее будет линия, тем сигнал дойдет до приемного устройства размытее.

Длина РУ основывается на обоих данных характеристиках. Следовательно, расчет регенерационного участка производится по затуханию и дисперсии. Наименьший участок будет удовлетворять обоим параметрам, поэтому за РУ выбирается именно он.

Расчет длины регенерационного участка (РУ) по затуханию:

$$L_{py} = \frac{(\mathcal{E}_n - a_{pc}n_{pc} - a_z)}{(\alpha + \alpha_{nc})} = \frac{(19 - 213 * 0,01 - 5)}{0,34 + \frac{0,1}{4}} = 32,52 \text{ км}, \quad (13)$$

где, $\mathcal{E}_n = P_{пер} - P_{пр}$ – энергетический потенциал ВОЛС (равен 19 дБ),

α – коэффициент затухания ОВ 0,34 дБ/км,

a_{pc} – потери в разъемном соединении, дБ/км (стандартизировано и равно 0,01 дБ/км),

n_{pc} – число разъемных соединителей (ввод в ОВ и вывод из него оптического излучения; посчитаем посредством деления длины участка А-Б на строительную длину ОК (4 км)), 213

a_{nc} – потери в неразъемном соединении, дБ/км,

a_z – энергетический запас системы необходимый для компенсации эффекта старения аппаратуры и ОК, а также потерь, возникающих после ремонта на кабеле, случаев некачественного сращивания сростков ОК и других отклонений, в среднем 5 дБ.

Поскольку необходимо реализовать передачу данных со скоростью 3,2 Гб/с, выбираем тип оборудования STM-64, количество потоков 1.

Расчет длины регенерационного участка по дисперсии будем производить по следующей формуле:

$$L_{py}^{\partial} = \frac{\Delta F_{ок}}{\Delta F_{ос}}, \quad (14)$$

где $\Delta F_{ос}$ – скорость передачи волоконно-оптической системы, 3,2 Гбит/с,

$\Delta F_{ок}$ – пропускная способность световода на 1 км длины

Определим пропускную способность световода на 1 км длины:

$$\Delta F_{ок} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{7нс / км} = 142 \text{ ГГц*км.} \quad (15)$$

Найдем длину регенерационного участка по дисперсии:

$$L_{py}^{\partial} = \frac{142}{3,2} = 44,475 \text{ км.} \quad (16)$$

Выбираем меньшую из полученных длин регенерационного участка и получаем 32,52 км.

Максимально допустимые длины регенерационных участков по потерям и дисперсии для ОМ кабеля: 32,52 км и 44.475 км соответственно.

Т.о. по окончанию строительной длины 4 км будем ставить муфту, а по истечению РУ – необслуживаемый регенерационный пункт (НРП).

Энергетический потенциал с учетом потерь на ввод и вывод энергии из волокна, или полный запас мощности системы, дБ, можно определить по формуле:

$$\Pi = P_{пер} - \alpha_{вх} - \alpha_{вых} - P_{пр мин}, \quad (17)$$

где $P_{пер}$ – мощность передатчика

$\alpha_{вх}$ – входное затухание

$\alpha_{вых}$ – выходное затухание

$P_{пр.мин}$ – минимальная мощность приемника

$$\Pi = -4.5 - 0.5 - 0.5 - (-29.5) = 24 \text{ дБм.} \quad (18)$$

3.5 Расчет энергетического запаса

Энергетический запас системы определяют как разность между полным запасом мощности и суммарным затуханием. Значение энергетического запаса работоспособной системы должно быть положительным.

$$\text{Эз} = \Pi - \alpha_{\Sigma} \quad (19)$$

$$\text{Эз} = 24 - 9.2 = 14.8 \text{ дБ} \quad (20)$$

3.6. Определение отношения сигнал/шум или вероятности ошибки, отводимой на длину регенерационного участка

Для цифровой волоконно-оптической системы связи, определяется по формуле:

$$p_{\text{ош ф}} = p' \cdot l_{\text{ру}} = 10^{-11} \cdot 200 = 0,0000000000375 = 0,0200 \cdot 10^{-9} \quad (21)$$

$p_{\text{ош ф}}$ – отношение сигнал/шум (вероятность ошибки) на фактическую длину регенерационного участка

$p_{\text{ош max}}$ – максимальное отношение сигнал/шум (вероятность ошибки) на фактическую длину регенерационного участка

где p' – вероятность ошибки на 1 км оптического линейного тракта (для магистральной сети 10^{-11} , для внутризоновой $1,67 \cdot 10^{-10}$, для местной 10^{-9})

$l_{\text{ру}}$ – длина регенерационного участка

$l_{\text{ру max}}$ – максимальная длина регенерационного участка

$$p_{\text{ош}} = p' \cdot l_{\text{ру}} = 10^{-11} \cdot 316 = 0,0319 \cdot 10^{-9} \quad (22)$$

$$p_{\text{ош max}} = p' \cdot l_{\text{ру max}} = 10^{-11} \cdot 396 = 0,0396 \cdot 10^{-9} \quad (23)$$

3.7 Определение уровня передачи мощности оптического излучения на выходе передающего оптического модуля (ПОМ)

Уровень передачи мощности оптического излучения на выходе ПОМ, дБм, определяется по формуле:

$$P_{\text{пер}} = P_c - \Delta P = -1.5 - 3 = -4.5 \text{ дБ}, \quad (24)$$

где P_c – уровень средней мощности оптического сигнала на выходе источника излучения;

ΔP – снижение уровня средней мощности, зависящее от характера сигнала.

3.8 Определение уровня мдм (порога чувствительности приемного оптического модуля – ПРОМ)

Уровень МДМ (порог чувствительности ПРОМ):

$$P_{\text{min}} = -70 + 11 \lg B \quad (25)$$

$$P_{\text{min}} = -70 + 21.5 = -49.5 \text{ дБ} \quad (26)$$

3.9 Определение быстродействия системы

Допустимое быстродействие зависит от характера передаваемого сигнала, скорости передачи информации и определяется по формуле:

$$t_{\Sigma} = \frac{\beta}{B} = \frac{0.4}{155 \cdot 10^6} = 2.57 \cdot 10^{-9} \text{ с}, \quad (27)$$

где β – коэффициент, учитывающий характер линейного кода, для NRZ $\beta = 0,4$

Общее ожидаемое быстродействие ВОСП рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{ож}} = 1.111 \sqrt{t_{\text{пер}}^2 + t_{\text{пр}}^2 + t_{\text{ОВ}}^2} = 0.94 \cdot 10^{-9}, \quad (28)$$

где $t_{\text{пер}} = (0,5...10)$ нс – быстродействие ПОМ (1нс);

$t_{\text{пр}} = (0,2...20)$ нс – быстродействие ПРОМ (0.8нс);

$t_{\text{ОВ}}$ – уширение импульса на длине регенерационного участка:

$$t_{\text{ОВ}} = \tau \cdot l_{\text{пу}}$$

$$t_{\text{ОВ}} = 17.5 \cdot 10^{-12} \cdot 316 = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

где τ – дисперсия оптического волокна, с/км.

Если $t_{\text{ож}} < t_{\Sigma}$, то выбор оптического кабеля сделан верно.

$$0.94 \cdot 10^{-9} < 2.57 \cdot 10^{-9} \quad (29)$$

Запас по быстродействию:

$$\Delta t = 2.57 - 0.94 = 1.63 \text{ нс} \quad (30)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертации рассмотрены особенности проектирование волоконно-оптической линии связи в условиях плотной городской застройки.

В ходе работы дан обзор существующих волоконно-оптических систем передачи информации на линиях связи, рассмотрены основные принципы построения современных волоконно-оптических линий связи. В работе выбран кабель с возможно низким затуханием и широкой полосой частот в расчёте на возможность его использования при развитии системы. Выпускаемое в настоящее время отечественными и зарубежными производителями промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,19...0,22 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчёте на один километр. Малое затухание и небольшая дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 км и более. В магистральных ВОЛС расходы на приобретение и прокладку оптического кабеля является основной частью стоимости всей системы. Поэтому целесообразно проложить кабель с возможно низким затуханием и широкой полосой частот в расчёте на возможность его использования при развитии системы. Для этого в ходе работы произведен расчет необходимого числа каналов и выбору системы передачи.

В данной работе произведен расчет основного электрооборудования электропитания. Предполагается использование кислотных аккумуляторов. Ёмкость аккумуляторных батарей зависит от тока нагрузки во время разряда, $I_{ав}$, А, в условиях отсутствия напряжения во внешней цепи переменного тока или отключённых буферных выпрямительных устройствах.

Обобщающим показателем качества работы средств связи является надёжность. Требуемая быстрота и точность передачи информации средствами электросвязи обеспечиваются высоким качеством работы всех звеньев сети электросвязи: предприятий, линий связи, технических средств.

Надёжностью называется свойство объектов выполнять свои функции с требуемыми показателями качества, определяемыми системой нормативно-

технической документацией в заданных условиях работы и в заданное время. Надёжность отражает влияние главным образом внутрисистемных факторов – случайных отказов техники, вызываемых физико-химическими процессами старения аппаратуры, дефектами её изготовления или ошибками обслуживающего персонала. В заключении можно перечислить достоинства и недостатки волоконно-оптической линии связи. К достоинствам относятся такие характеристики оптоволокна: широкая полоса пропускания- обусловлена чрезвычайно высокой частотой, несущей 10¹⁴Гц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Также малое затухание светового сигнала в волокне, низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле, высокая помехозащищенность, малый вес и объем, высокая защищенность от несанкционированного доступа и т.д.

В ходе работы дан обзор существующих волоконно-оптических систем передачи информации на городских линиях связи, рассмотрены основные принципы построения современных волоконно-оптических линий связи. Также освещены возможные способы построения дуплексных ВОСП. Приведена сравнительная характеристика принципов построения дуплексных ВОСП, в результате чего сделан вывод, что наиболее приемлемым вариантом организации дуплексной ВОСП на ГТС является ВОСП с модуляцией оптического сигнала по интенсивности и применением оптических разветвителей.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, главным образом из-за дороговизны прецизионного монтажного оборудования и надежности лазерных источников излучения. Многие из недостатков вероятнее всего будут нивелированы с приходом новых конкурентоспособных технологий в волоконно-оптические сети. Основным недостатком является стоимость интерфейсного оборудования, монтаж и обслуживание оптических линий, требование специальной защиты волокна и т.д.

Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники остается пока еще довольно высокой. При создании оптической линии связи также требуются высоконадежные специализированное коммутационное пассивное оборудование, оптические соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение-отключение, оптические разветвители, аттенюаторы. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи также остается высокой. Если же повреждается ВОК, то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды. Производители тем временем поставляют на рынок все более совершенные инструменты для монтажных работ с ВОК, снижая цену на них. Прочно ли оптическое волокно? Теоретически да. Стекло как материал выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1ГПа (109 Н/м²). Это, казалось бы, означает, что волокно в единичном количестве с диаметром 125 мкм выдержит вес гири в 1 кг. К сожалению, на практике это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксиакрилата, а сам оптический кабель упрочняется, например, нитями на основе кевлара (kevlar). Если требуется удовлетворить еще более жестким условиям на разрыв, кабель может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля. Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, дальнейшие перспективы развития технологии ВОЛС в информационных сетях более чем очевидны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи/ Слепов Н.Н. – М.: Радио и связь, 2000.
2. Учебное пособие: проектирование линейных трактов волоконно-оптических систем передачи/ Семейкин В.Д. – Астрахань, 2001
3. Синхронные цифровые сети SDH/ Слепов Н.Н. – М., 1997.
4. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник/ Под ред. Гроднева И.И. – М.: Р и С, 1993.
5. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы/ Под ред. Дмитриева С.А. – Изд. “Коннект“, М.: 2000.
6. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения/ Иванов А.Б. – Изд. “Сайрус системс”, М.: 1999.
7. <https://habrahabr.ru/post/178825/>
8. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%8F
9. www.incab.com
10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>
11. Техническое руководство по волоконной оптике/ Стерлинг Д.Д., мл. – М.: ЛОРИ. 1998.
12. Fiberoptic communication systems, Second edition/ Agrawal G.P. – John Wiley&Sons Inc., 1997.
13. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и автоматики/ Виноградов В.В., Кустышев С.Е., Прокофьев В.А. – М.: Издательство «Маршрут», 2002.

14. Волоконно-оптические сети/ Убайдуллаев Р.Р. – М.: Эко-Трендз, 1998
15. Волоконно-оптические системы связи на ГТС: Справочник/ Берлин Б. З., Брискер А. С., Иванов В. С. – М.: Радио и связь, 1994.
16. Современные волоконно-оптические системы передач, аппаратура и элементы/ Скляр О. К. – М.: Издательство "СОЛОН-Р", 2001.
17. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы/ Олифер В.Г., Олифер Н. А. – СПб.: Издательство "Питер", 2000
18. Волоконно-оптические системы передачи/ Бутусов М. М., Верник С. М., Балкин С. Л. – М.: Радио и связь, 1992.
19. Усилительные устройства/ Мурадян А.Г. – М.: Связь, 1996.
20. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник/ Под ред. Якубовского С.В. – М.: Радио и связь, 1990.
21. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий/ – М.: Издательство стандартов, 1995.
22. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы/ Скляр О.К. – М.: СОЛОН-Р, 2011.
23. Направляющие системы электросвязи, раздел ВОЛС. Лекционно-теоретический материал/ Сакабаева А.К. Алматы, МОК КАУ, 2012
24. Проектирование волоконно-оптических линий связи: методические указания/ монография в реферативной форме/ Сакабаева А.К. 2012
25. Волоконно-оптические системы передачи и кабельные системы/ Гроднев Н.И, Мурадян А.Г – М.: Радио и связь, 2009

