

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»  
Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
к.т.н., Шагиахметов Д.Р.  
(ученая степень, звание, ФИО) (подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: Повышение качества работы сетей доступа при использовании  
ВОЛС

|   |                            |                                    |
|---|----------------------------|------------------------------------|
| Магистрант <u>Калитаев А.Р.</u><br>(Ф.И.О.)                             | _____ (подпись)            | группа <u>ИТСП-12-1</u>            |
| Руководитель <u>к.т.н. проф.</u><br>(ученая степень, звание)            | _____ (подпись)            | <u>Казиева Г.С.</u><br>(Ф.И.О.)    |
| Технический консультант   | _____ (подпись)            | _____ (Ф.И.О.)                     |
| Рецензент <u>к.т.н., зав. каф АУ КазАТК</u><br>(ученая степень, звание) | _____ (подпись)            | <u>Шульц В.А.</u><br>(Ф.И.О.)      |
| Консультант по ВТ <u>к.х.н., ст.преп.</u><br>(ученая степень, звание)   | <u>Данько</u><br>(подпись) | <u>Данько Е.Т.</u><br>(Ф.И.О.)     |
| Нормоконтроль <u>ст.преп.</u><br>(ученая степень, звание)               | _____ (подпись)            | <u>Абрамкина О. А.</u><br>(Ф.И.О.) |

Алматы, 2014

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет «Радиотехники, электроники и связи»  
Специальность 6М071900 «Радиотехники, электроники и телекоммуникации»  
Кафедра «Телекоммуникационных систем»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Калитаеву А.Р.  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Повышение качества работы сетей доступа при использовании ВОЛС»  
утверждена Ученым советом университета №142 от «31» октября 2013 г.  
Срок сдачи законченной диссертации «25» декабря 2013 г.  
Цель диссертационной работы состоит в анализе методов исследований показателей качества обслуживания в сети доступа, провести необходимые эксперименты, используя метод оптической рефлектометрии

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Технология доступа FTTH
2. Оценка затухания в пассивных оптических сетях при различных неоднородностях
3. Исследования сигналов с помощью метода оптической рефлектометрии
4. Расчет параметров надежности волокон в оптическом кабеле

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- Рисунок 2.2 – Схема измерения сигнала в PON
- Рисунок 2.3 – Зависимость затухания от расстояния
- Рисунок 2.4 – Сравнительные характеристики коэффициента затухания от длины волны для различных расстояний
- Рисунок 3.9 – Зависимость вероятности возникновения старения работы оптоволокна от времени

Рекомендуемая основная литература

1. Пассивные оптические сети PON. Абонентский участок FTTH // Компания ДЕПС [Эл. ресурс] - URL: [www.etkis.ru](http://www.etkis.ru)

2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005 – 208 с.

3. Скляр О.К. “Современные волоконно-оптические системы передачи”. - М.: Солон-Р, 2001. - 296 с.

**Г Р А Ф И К**  
подготовки магистерской диссертации

| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов   | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|--|---|------------|
| 1 Информационный обзор согласно темы диссертации   | 01.10.2012                                |            |
| 2 Создание модели для проведения эксперимента  | 14.01.2013                                |            |
| 3 Экспериментальное исследование затухания в ВОЛС  | 02.02.2013                                |            |
| 4 Исследование трафика сигналов в проводных сетях, рассмотреть вопросы качества обслуживания широкополосной сети | 20.02.2013                                |            |
| 5 Расчет параметров оптоволокна  | 12.03.2013                                |            |
| 6 Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных   | 02.11.2013                                |            |
| 7 Оформление диссертационной работы  | 25.12.2013                                |            |
|  |   |            |
|  |   |            |
|  |   |            |

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_ 05.09.2012 г. \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (Коньшин С.В.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ (Казиева Г.С.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению  
магистрант \_\_\_\_\_ (Калитаев А.Р.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

## **Аңдатпа**

Осы магистрлік жұмыста оптикалық талшық байланыс желісі жөнінде FTTH технологиясын жүзеге асыру мәселесі қарастырылды. Оптикалы талшықты трактсін сапасына анализдеу үшін рефлектометрлік әдістер пайдаланылады. Абоненттік қатынаудың қазіргі заманғы даму күйінде ақпараттық шолуы өткізілді. ТООБЛ үшін тасымалданатын ақпараттың сапасын әр алуан тарату параметрлермен эксперименттік зерттеу жұмыстары көрсетілген.

## **Аннотация**

В данной магистерской работе рассмотрены вопросы реализации технологии FTTH на базе ВОЛС. Для анализа качества волоконно-оптического тракта используются рефлектометрические методы. Проведен информационный обзор по современному состоянию развития абонентского доступа. Показаны экспериментальные исследования по качеству передаваемой информации при различных параметрах передачи для ВОЛС.

## **Annotation**

In this dissertation thesis, the FTTH technology realization based on VOLS - is considered. A OTDR methods are used for the analysis of quality of a fiber-optical path. The information review on a current state of development of subscriber access is carried out. Experimental explorings of the quality of transmitted information in different transmission parameters are shown.



## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 10 |
| 1 Информационный обзор по современному состоянию развития абонентского доступа в РК.....   | 12 |
| 1.1 Характеристика динамики развития абонентской базы абонентов широкополосного доступа.....                                     | 12 |
| 1.2 Реализация доступа следующего поколения.....   | 13 |
| 1.3 Технология доступа FTTH .....  | 20 |
| 1.4 Технология Ethernet FTTH .....   | 24 |
| 1.5 Требования, предъявляемые к сети доступа .....   | 27 |
| 1.6 Исследования трафика сигналов в проводных сетях при использовании распространенных протоколов Ethernet, ОКС 7, VoIP, TCP.... | 27 |
| 1.7 Исследования случайных процессов в сетях доступа.....  | 29 |
| 1.8 Качество обслуживания широкополосной сети .....  | 30 |
| 2 Экспериментальная часть.....   | 32 |
| 2.1 Метод оптической рефлектометрии.....   | 32 |
| 2.2 Оценка затухания в пассивных оптических сетях при различных неоднородностях .....  | 34 |
| 3 Расчетная часть.....   | 37 |
| 3.1 Расчет показателей качества обслуживания широкополосной сети .   | 37 |
| 3.2 Исследования сигналов с помощью метода оптической рефлектометрии.....  | 40 |
| 3.3 Расчет параметров качества обслуживания сети с технологией доступа GPON .....  | 43 |
| 3.4 Оценка пропускной способности по заданной нагрузке .....   | 46 |
| 3.5 Результаты расчета.....  | 48 |
| 3.6 Расчет параметров надежности волокон в оптическом кабеле.....  | 50 |
| 3.7 Расчет кумулятивной опасности обрыва от статических нагрузок и расчет надежности оптического волокна при его старении .....  | 54 |
| 3.8 Расчет надежности оптического кабеля .....   | 58 |
| 3.9 Расчет взаимных влияний в оптическом кабеле.....   | 60 |
| Заключение .....   | 65 |
| Перечень сокращений.....   | 66 |
| Список литературы .....  | 68 |
| Приложение А .....   | 69 |
| Приложение Б.....  | 70 |

## Введение

Оптические сети доступа. Оптические сети имеют серьезные преимущества перед сетями, построенными на основе обычного медного или коаксиального кабеля. Они обеспечивают гораздо более высокие скорости передачи данных на большие расстояния и при этом абсолютно нечувствительны к электромагнитным помехам и перекрестным наводкам.

В последние годы сети доступа (СД) являются наиболее динамичным сегментом телекоммуникационной отрасли. Они непосредственно связаны с предоставлением операторских услуг абонентам, поэтому СД хорошо окупаются даже в условиях неблагоприятной экономической ситуации. Здесь постоянно совершенствуются технологии для удовлетворения новых потребностей пользователей, появляются новые, характерные только для этих сетей, технические решения.

В отличие от транспортных сетей (межстанционных, междугородных и т.п.), в СД только начинается переход на оптические технологии в фиксированной связи. Поэтому можно с уверенностью сказать, что СД находятся в фазе развития, что делает их технически и финансово привлекательными.

Популярная в последнее время концепция «тройной услуги» (TriplePlay) предусматривает предоставление пользователям телефонии, передачи данных и видеoinформации через одну сеть. Причем высокоскоростной интернет и видео требуют значительной широкополосности сетевых ресурсов. Кроме того, повышение спроса на широкополосный доступ определяется развитием новых технологий: видео по запросу (VOD), потоковое видео, интерактивные игры, видеоконференции, передача голоса в компьютерных сетях (VoIP), телевидение высокой четкости (HDTV) и другие.

Выбор оптимальной топологии зависит от целого ряда факторов, связанных с конкретными условиями проектирования (плотность абонентов, их расположение, виды услуг и т.д.), а также от базовой оптической технологии.

В последнее время на оптических сетях доступа наиболее часто используются три интегральные технологии:

- Микро сеть SDH (Micro SDH);
- Активные сети Ethernet (Active Ethernet, AE);
- Пассивные оптические сети (Passive Optical Network, PON).

При выборе технологии широкополосного доступа провайдеры должны учитывать потребности пользователей, их расположение, основные запрашиваемые услуги, различные экономические аспекты. Проектируемая сеть должна быть широкополосной, гибкой, надежной, управляемой, масштабируемой, удобной в эксплуатации.

Таким образом, применение оптических решений на сетях доступа становится единственным подходящим способом организации широкополосного фиксированного доступа. Уже сейчас, используя реальные

оптические технологии (Passive Optical Network, Active Ethernet, Micro SDN и др.), возможна организация высокоскоростных потоков 1- 2,4 Гбит/с до абонента. А применение технологий волнового мультиплексирования позволит передавать такие потоки на каждой из нескольких оптических несущих. Причем оптические технологии постоянно совершенствуются и удешевляются.

Целью магистерской диссертации является повышение качества работы сети доступа при использовании ВОЛС. Для достижения цели необходимо выполнить следующие работы:

- осуществить анализ методов исследований показателей качества обслуживания в сети доступа;
- дать характеристику динамики развития абонентской базы абонентов широкополосного доступа;
- исследовать трафик сигналов в проводных сетях при использовании распространенных протоколов Ethernet, ОКС 7, VoIP, TCP и рассмотреть вопросы качества обслуживания широкополосной сети;
- провести необходимые эксперименты, используя метод оптической рефлектометрии и сделать необходимые расчеты.

# 1 Информационный обзор по современному состоянию развития абонентского доступа в РК

## 1.1 Характеристика динамики развития абонентской базы абонентов широкополосного доступа

В Государственной программе «Информационный Казахстан – 2020» описано, что по состоянию на первое полугодие 2012 года развитие услуг телекоммуникаций в РК характеризуется следующими основными индикаторами [1]:

- уровень цифровизации местных сетей телекоммуникаций составляет 95,6%;
- количество пользователей сети Интернет достигло 8,8 миллионов человек (53,5 %);
- количество абонентов фиксированной телефонной связи составило более 4,2 млн. абонентов (26%);
- количество абонентов сотовой связи составило 26,2 млн. абонентов (158,3 %).

Одной тенденцией до 2015 года является завершение строительства и развитие широкополосного доступа (ШПД) к сети Интернет по технологии FTTH (Fiber to the Home – оптоволоконно до дома) по технологии GPON (Gigabit Passive Optical Network – гигабитная пассивная оптическая сеть) во всех городах и областных центрах для развития:

- электронного здравоохранения;
- электронной коммерции;
- технологии CAN (сеть контроллеров) и др.

Согласно данным аналитической компании J'son & Partners Consulting динамика абонентской базы частных абонентов широкополосном доступе и ARPU (Average revenue per user, средняя выручка на одного пользователя) в Казахстане на 2009-2013 гг. показана на рисунке 1.1 [2].

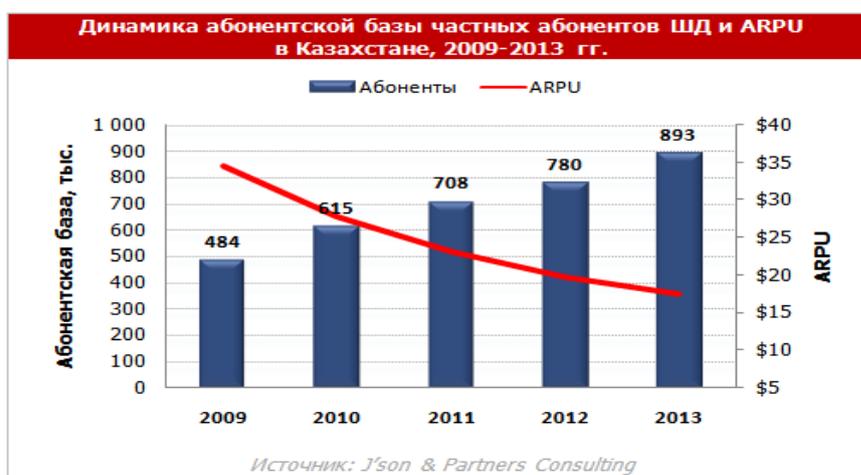


Рисунок 1.1 – Динамика развития абонентов ШПД

На рис. 1.2 показано распределение трафика данных при доступе в Интернет. Поток трафика на этой и двух других приведенных ниже схемах показаны стрелками. Толщина стрелок отражает объемы передаваемого трафика и требуемую для его передачи пропускную способность.

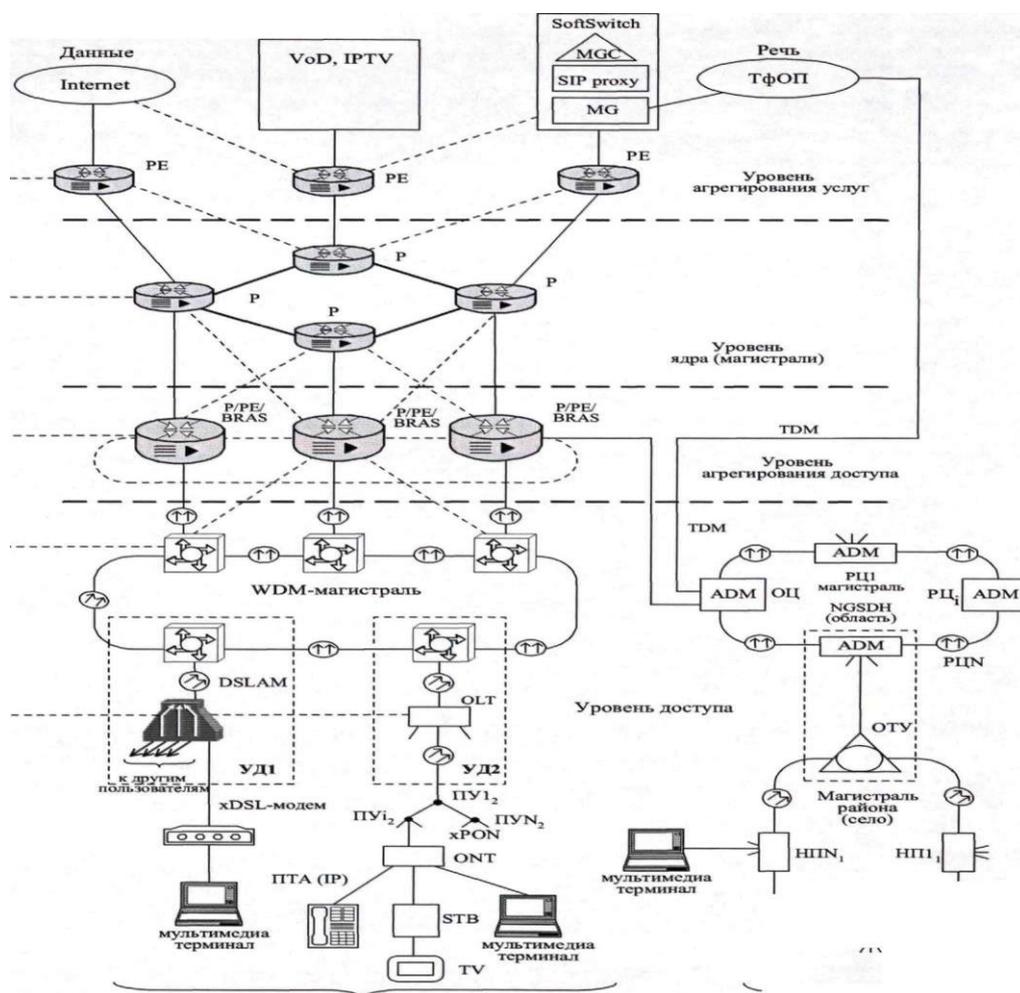


Рисунок 1.2 – Распределение трафика данных при доступе в Интернет.

## 1.2 Реализация доступа следующего поколения

В постоянно наращиваемой сетевой инфраструктуре широкополосный абонентский доступ рассматривается как узкое место или «bottleneck» по причине ограниченной полосы пропускания. Существующие медные технологии, такие как DSL и доступ по коаксиальному кабелю, в данный момент, уже на пределе своих возможностей: могут обеспечить максимальную скорость не более, чем несколько десятков Мбит/с в сторону конечного пользователя, причем на сравнительно небольшое расстояние передачи [3,4]. Чтобы соответствовать возрастающим требованиям потребителей по увеличению полосы пропускания предпочтение отдается оптическим сетям доступа (ОСД).

Доступ следующего поколения (NGA, Next-generation access) термин обычно используется для обозначения сетей доступа, состоящих полностью или частично из оптического волокна, что может обеспечить доступ в Интернет и обеспечить доставку приложений на более высоких скоростях. Это достаточно простая концепция, но реализация является более сложным и во многом зависит от местных факторов, в том числе на рынке и нормативно-правовой среды [5]. Переход к NGA это необходимость по предоставлению различных услуг пользователю. Конечным результатом является множество различных бизнес-моделей и подходов к развертыванию волокна в сетях доступа. В мире к июню 2011 года насчитывалось более 66 миллионов решений FTTH. Переход к FTTH осуществили в Азиатско-Тихоокеанском регионе, количество пользователей составляет свыше 46 млн. абонентов. В Северной Америке абонентов FTTH составляет более 9,5 млн. Развертывание этой технологии развивалось несколько медленнее – всего 4,6 млн. абонентов FTTH. В России – 5,6 млн. Но рынок ускоряется темп в этом направлении и рост за первое полугодие 2011г. в целом составил 14 процентов.

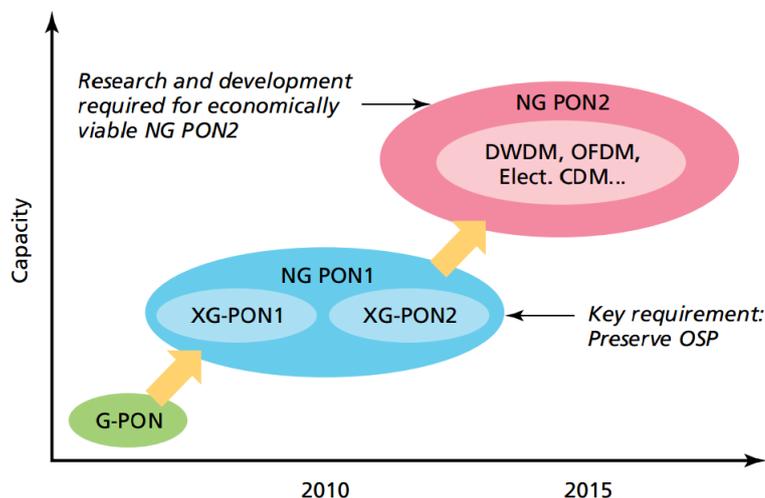


Рисунок 1.3 – Доступ следующего поколения

Вместо использования соединения точка-точка (P2P) пассивные оптические сети (PON – Passive Optical Networks) используют архитектуру точка-многоточка (P2MP). PON архитектура используется в следующих схемах и технологиях организации связи:

- Time Division Multiplexing PONs (TDM)[6];
- Wavelength Division Multiplexing (WDM)[7];
- Optical Code Division Multiplexing (OCDM);
- Sub-Carrier Multiplexing (SCM).

В ближайшие несколько лет преобладающими технологиями будут [8]:

- Ethernet PON (EPON);
- Gigabit PON (GPON);
- 10 Гбит/с 10G-EPON.

Аспекты развития сетей PON следующего поколения - эволюционный путь существующих систем TDM-PON в соответствии с концепцией, предложенной ITU, может быть представлен тремя основными направлениями [4]:

- увеличение скорости до 10 Гбит/с;
- достижение расстояния передачи до 80 км (Long Reach PON);
- увеличение коэффициента разветвления.

Чтобы достигнуть увеличения скорости, требуются высокоскоростные трансиверы, работающие в режиме высокочастотных пульсаций (burst mode) и способные быстро восстанавливать уровень и фазу для каждого отдельного высокочастотного импульса.

Для выполнения требований 2 и 3 направлений могут быть использованы полупроводниковые оптические усилители (SOA – Semiconductor Optical Amplifier). Это не вызовет прерывания текущих сервисов, так как SOA «прозрачен» к формату и скорости передаваемых данных.

Усовершенствование решений в TDM-PON должно ориентироваться не только в сторону увеличения полосы пропускания и расстояния, но и привносить в систему как можно больше интеллектуальных возможностей для создания интеллектуальных узлов IN (Intellectual Nodes). Так, например, установка пассивного сплиттера в TDM-PON осуществляется для распределения оптической мощности между пользователями эквивалентно.

Данный подход не требует дополнительных источников питания, таким образом, предполагая экономию энергии. Однако отсутствие интеллектуальных функций делает сеть негибкой и уязвимой для сетевых атак. Более того, данная архитектура не обеспечивает переход от TDM к WDM сетям. Сценарий эволюции обусловлен актуальными задачами, адресованными в первую очередь к существующим PON-решениям [4].

FTTH – широкополосная услуга, которая становится незаменимым инструментом для бизнес-пользователей, так и потребителей. Это позволяет получить доступ к множеству услуг, включая интернет-магазины и банковское дело, развлечений и игр, дистанционного образования и телеработы, для оплаты коммунальных услуг и для здравоохранения и др. В результате, количество абонентов широкополосного доступа во всем мире ежегодно продолжает расти, и в настоящее время превышает 500 млн., согласно данным источника Point Topic.

Закон Нильсена (Nielsen's Law), основанный на эмпирических наблюдениях утверждает, что скорость подключения к сети для активных пользователей увеличится на 50 процентов в год, или будет удваиваться каждые 21 месяцев. Сформулированный в 1984 году, этот закон по-прежнему актуален и по настоящее время. Тенденция к передаче интенсивных потоков данных продолжается с повсеместным освоением передачи (HD) видео высокой четкости видео (1920x1080 пикселей). Следующий на горизонте является введение форматов ультра- HD, которые имеют в 16 раз больше

пикселей. За последние несколько лет потребление онлайн-видео развивалась на некачественных программ и фильмов, поставленных через платформ, таких как Apple TV, BBC Iplayer, и Netflix. Потребительское поведение тоже меняется, в результате чего люди, стремящейся смотреть меньше линейного программирования вещания и больше контент по запросу.

Приложения следующего поколения, такие как потребительское телеприсутствие предъявляет более высокие требования к производительности сети. На основе двусторонней одновременной передачи видео, голоса и трафика приложений, телеприсутствия требует симметричной скорости, а также малое время задержки и джиттера (задержка передачи и вариация), что позволит пользователям взаимодействовать в режиме реальном времени. В отличие от пульсирующего компьютерного трафика (просмотр веб-страниц) сеть должна передавать приложения videocentric, таких как телеприсутствия, которые создают потоковые трафики.

Видеосвязь также лежит в основе многих других услуг нового поколения, в том числе телемедицина, дистанционный уход за пожилыми людьми, онлайн-обучения, сеть контроллеров, строительной безопасности и др. В 2009 году Cisco® (VNI) прогнозировали, что видео станет доминирующим типом интернет-трафика [9] и что ежегодный глобальный интернет-трафик вырастет в четыре раза между 2010г. и 2015г. достигнув 966 объема данных экзабайт или почти зетта байт ( $10^{21}$  байт данных). Интернет-видео будет составлять 61 процентов от общего трафика в 2015 году, что касается 2010 года рост составил 26 процентов, что делает его самым важным фактором в этом росте (рисунок 1.4).

Увеличение интернет-трафика, предсказанного прогноза Cisco VNI будет также зависеть от того, как организован доступ в Интернет. Если в 2010 году потребительский интернет-трафик ПК был сгенерирован 96 процентов, то этот показатель упадет до 84 процентов к 2015 году в связи с резким увеличением количества интернет-устройств, таких как портативные компьютеры, смартфоны и подключенных телевизоров. В свою очередь, это увеличение приведет к удвоению соединений Интернет-приложений к 2015 году, что составит почти 15 миллиардов глобальных сетевых соединений в мире, а это означает, что на каждого пользователя будет больше, чем два подключенных устройств для каждого человека на земле.

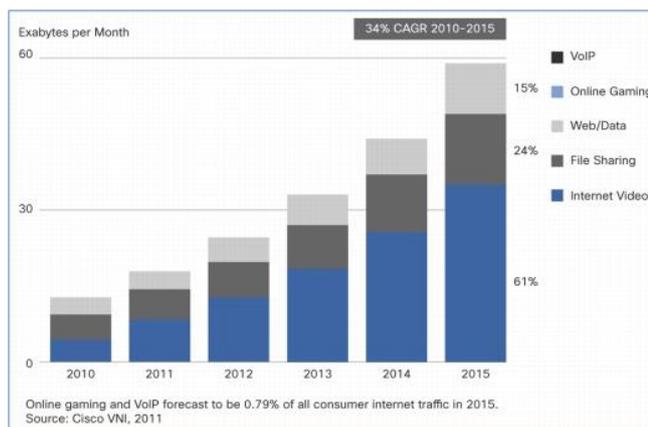


Рисунок 1.4 – Прогноз Cisco VNI развития приложений

Растущая популярность подключенных устройств повысит желательность хранения данных на основе облачных технологий, что обеспечит пользователям доступ к своим данным с любого устройства и синхронизации данных между несколькими устройствами. Облачные технологии уже прочно утвердились и становятся популярными.

Удаленные хранилища данных, таких как Amazon Cloud Drive и Dropbox, Google Docs и Microsoft Office Web Apps, сайты фото-и видеосервисов, блоги и социальные сети являются примерами услуг, которые находятся в облаке. Скорости должны быть достаточно высокие и в идеале симметричные, для поддержки передачи в разумные сроки, в частности, при загрузке больших файлов, необходимых для резервного копирования жесткого диска. Кроме того, низкая задержка имеет важное значение для облачных приложений, которые требуют ответа, например, онлайн-игр и производительности инструментов бизнеса. Согласно данным, аналитической компании Heavy Reading «FTTH Worldwide Market & Technology Forecast», прогноз роста полосы пропускания мирового рынка и технологии FTTH на 2018 представлен на рисунке 1.5 [10].

Необходимы методы кодирования с различными атрибутами для сжатия изображения, например, пространственной избыточность, временная избыточность. Технологии позволяющие осуществить сжатие без потерь, хотя квантование всегда приводит к потере информации. Очевидно, что если изображение не имеет временную избыточность из-за быстрых изменений сцены или быстрого движения в значительной части изображения, или если изображение имеет мало пространственной избыточности, степень сжатия в течение определенного качества изображения будет ограничено. HD видео начинается с несжатом битрейтом около 1,5 Gbps (в Европе), который затем обрабатывается с помощью кодека сжатия H.264 технологии.

В большинстве случаев, скорости передачи битов около 8 Мбит поставит хороший компромисс между сжатием и качеством изображения.



Рисунок 1.5 – Прогноз роста полосы пропускания

Большинство FTTH операторы предлагают стандартный "Triple-Play" пакет телефонии, широкополосный доступ, а также видео, в то время как некоторые из них также предлагают широкий набор услуг, которые клиенты могут выбрать через интернет-порталы, такие как резервное копирование на основе облака данных, домашней безопасности и мобильный телефон разгрузки (например, фемтосоты).

Рекомендация NGA заключается в следующем: сеть построения должна быть иерархической: уровень инфраструктуры (доступ к протоков), физический уровень (волокно разделение) и активный слой.

### Принципы организации логической структуры

Передача информации, взаимодействие пользовательских процессов и предоставление услуг на основе структурно-функциональной модели МС, приведенной на рис. 1.5, осуществляется посредством взаимодействия на всех уровнях рассматриваемой, СД и МС различных\* стеков сетевых протоколов. На каждом из участков СД и верхних уровней МС функционируют свои стеки протоколов [29].

Под стеком протоколов будем понимать иерархически организованный взаимосвязанный комплекс протоколов, необходимый и достаточный для организации передачи информации в СД и МС и для представления пользователям всего заявленного пакета услуг.

Совокупность стеков протоколов, функционирующих на различных участках и уровнях модели СД и МС, будем именовать термином «логическая структура».

Для анализа и описания логической структуры будем применять принцип декомпозиции — отдельного описания элементов логической структуры на разных участках МС.

На уровнях приложений, для каждого вида услуг расположены свои стеки протоколов. Для доступа в Интернет - HTTP (Hyper Text Transfer Protocol - протокол передачи гипертекста), FTP (File Transfer Protocol - протокол передачи файлов), SMTP (Simple Transfer Protocol — простой протокол электронной почты) и ряд других протоколов из стека Интернет [86, 87].

Для видеоприложений на этом уровне расположен стек протоколов кодирования - декодирования и сжатия видеоизображений MPEG-2/4 (Motion Pictures Experts Group - Группа разработки стандартов кодирования видеoinформации) [35], AVC/H.264 (Advanced Video Coding), а также протокол управления многоадресной рассылкой (мультикастинг) IGMP (Internet Group Management Protocol — межсетевой протокол управления группами пользователей) [86, 89].

Для сервиса IP-телефонии (VoIP) - в правой части рис. 1.6 - в верхней части стека приложений размещаются протоколы кодирования и сжатия речевых потоков [77, 78, 79, 80], в левой части этого сервисного стека приведены протоколы управления сеансами речевого и мультимедийного видеотелефонного обмена SIP (Session Initiation Protocol - протокол инициирования сеансов). Этот протокол в настоящее время вытеснил более сложную систему протоколов H.323 и является в современных сетях основным протоколом организации, изменения и завершения сеансов [87], а протокол SDP (Session Description Protocol - протокол описания сеансов) управляет межтерминальным взаимодействием в процессе проведения SIP-сессий [83].

Нижний уровень xPON зависит от применяемой технологии PON. В современных высокоскоростных сетях используются одна из двух технологий — GPON или GEPON. Ниже будет рассмотрена логическая структура для каждой из этих двух технологий. В правой части схемы показан стек протоколов характерный для узла доступа

Базовым протоколом является Ethernet, определяющий форматы передаваемых и коммутируемых кадров. В левой части показан один из N стеков протоколов xPON, поддерживающих работу N сегментов (деревьев) PON, объединяемых одним OLT.

Кадры, поступающие от уровня Ethernet упаковываются в специальный промежуточный формат, который затем помещается в специализированные кадры, располагаемые в транспортные контейнеры для передачи по сети GPON. При поступлении контейнеров из сети GPON осуществляется обратная операция, и кадры Ethernet, извлекаемые из транспортной логической структуры выдаются на уровень Ethernet.

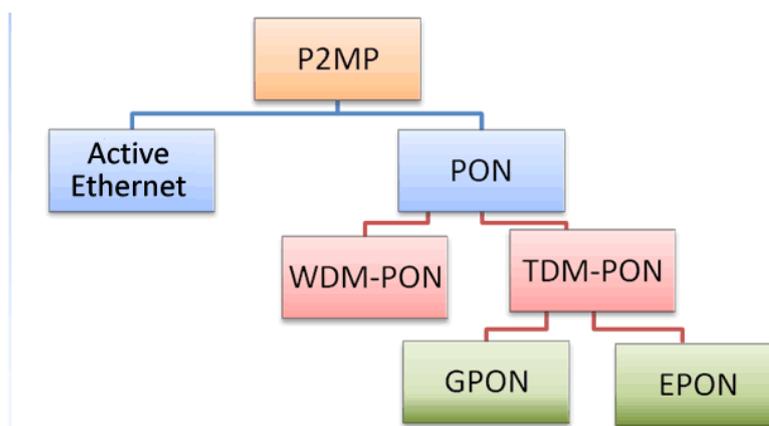
### 1.3 Технология доступа FTTH

На сегодня существуют несколько способов развертывания технологии построения оптических сетей FTTx (Fiber To The). Различаются они между собой по близости доступа оптоволокна пользовательскому терминалу. Эта технология классифицируется на:

- FTTN (Fiber To The Node) — волокно до сетевого узла;
- FTTC (Fiber To The Curb) — волокно до микрорайона, квартала или группы домов;
- FTTB (Fiber To The Building) — волокно до здания;
- FTTH (Fiber To The Home) — волокно до жилища (квартиры или отдельного коттеджа).

При этом в технологии FTTH сетевой архитектуры существует три различных архитектуры волоконных сетей доступа (рисунок 1.6) [11]:

- точка-точка P2P (point to point), - точка-многоточка P2MP (point to multipoint) PON, - активная звезда (комбинация с медью).



Source: ICP-ANACOM

Рисунок 1.6 – Архитектуры технологии FTTH

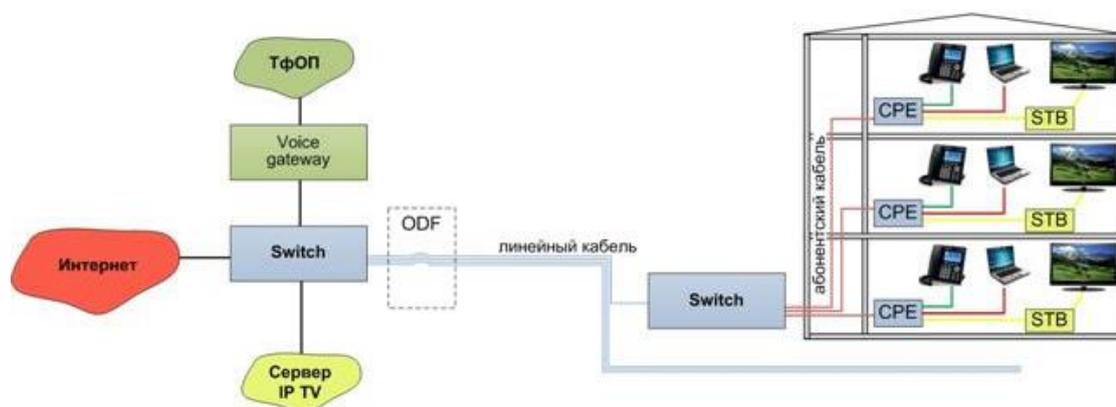


Рисунок 1.7 – Архитектура P2P

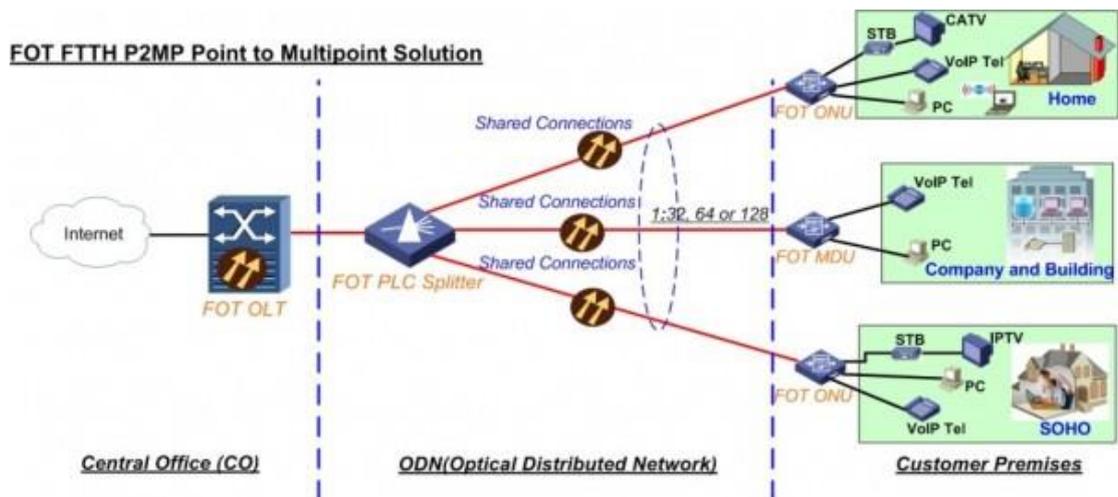


Рисунок 1.8 – Архитектура P2MP

Технология реализуется на основе: сплиттеров и коммутаторов, показанные на рисунках 1.9 и 1.10 [12].

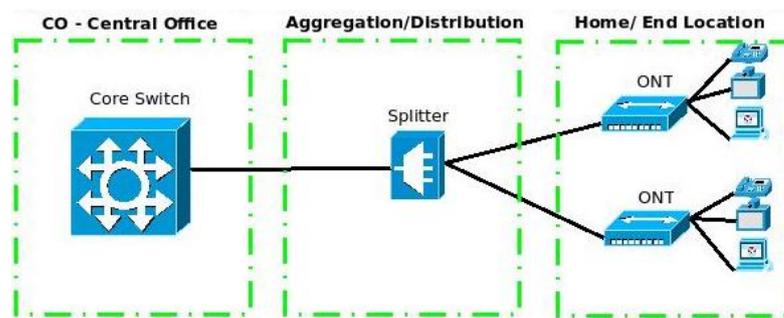


Рисунок 1.9 – Реализация FTТх на основе сплиттеров

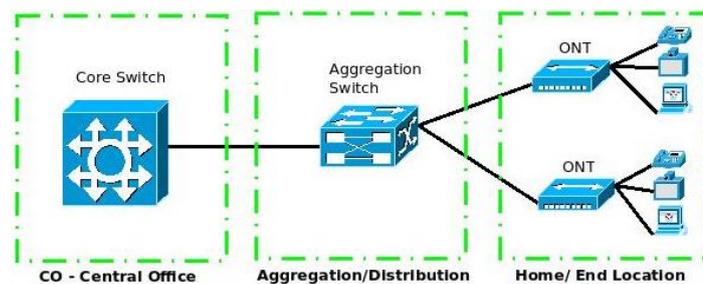


Рисунок 1.10 – Реализация FTТх на основе коммутаторов

Наличие несколько сетевых архитектур, технических реализаций FTТН говорят о том, что эта технология все еще развивается. В общем, варианты реализации классифицированы как активные Star и пассивные оптические сети (PON). Основное отличие, как следует из названия, является то, что активные сети соединяют каждый дом к переключателю и несколько волокон пассивно соединены вместе в сетях PON [13].

В таблице 1.1 приведены для сравнения характеристики стандартов PON.

Таблица 1.1 – Сравнительная таблица по стандартам PON

| Характеристики                                       | APON (BPON)                     | EPON (GEPON)                           | GPON   |
|--|---------------------------------|--|--|
| Институты стандартизации/альянсы                     | ITU-TSG15/FSAN                  | IEEE/EFMA                              | ITU-T SG15/FSAN                                |
| Дата принятия стандарта                              | октябрь 1998                    | июль 2004                              | октябрь 2003                                   |
| Стандарт   | ITU-T G.981.x                   | IEEE 802.3ah                           | ITU-T G.984.x                                  |
| Скор.пер., прямой/ обратный поток, Мбит/с            | 155/155;<br>622/155;<br>622/622 | 1000/1000                              | 1244/155, 622, 1244<br>2488/622, 1244,<br>2488 |
| Базовый протокол                                     | ATM                             | Ethernet                               | SDH (GFP)                                      |
| Линейный код   | NRZ                             | 8B/10B                                 | NRZ  |
| Максимальный радиус сети, км                         | 20                              | 20 (>30 <sup>1</sup> )                 | 20   |
| Максимальное число абонентских узлов на одно волокно | 32                              | 16                                     | 64 (128 <sup>2</sup> )                         |
| Приложения   | любые                           | IP, данные                             | любые  |
| Коррекция ошибок FEC                                 | предусмотрена                   | Нет                                    | необходима                                     |
| Длины волн прямого/обратного потоков, нм             | 1550/1310<br>(1480/1310)        | 1550/1310<br>(1310/1310 <sup>3</sup> ) | 1550/1310<br>(1480/1310)                       |
| Динамическое распределение полосы                    | есть                            | поддержка <sup>3</sup>                 | есть   |

Примечания:

<sup>1</sup> – обсуждается в проекте;

<sup>2</sup> – стандарт допускает наращивание сети до 128 ONT;

<sup>3</sup> – осуществляется на более высоких уровнях.

В настоящей работе будет рассматриваться реализация FTTH на основе коммутаторов, так как эта технология широкополосная (высокоскоростная), поддерживает симметричные скорости передачи данных к пользователю и от пользователя. В таких FTTH сетях проще обеспечить более высокий уровень качества обслуживания абонентов, так как проще обеспечить бесперебойное питание коммуникационного оборудования, а также его резервирование и замену. При этом оптический доступ устанавливается в одном из двух топологий P2P или P2MP, как показано на рисунке 1.11.

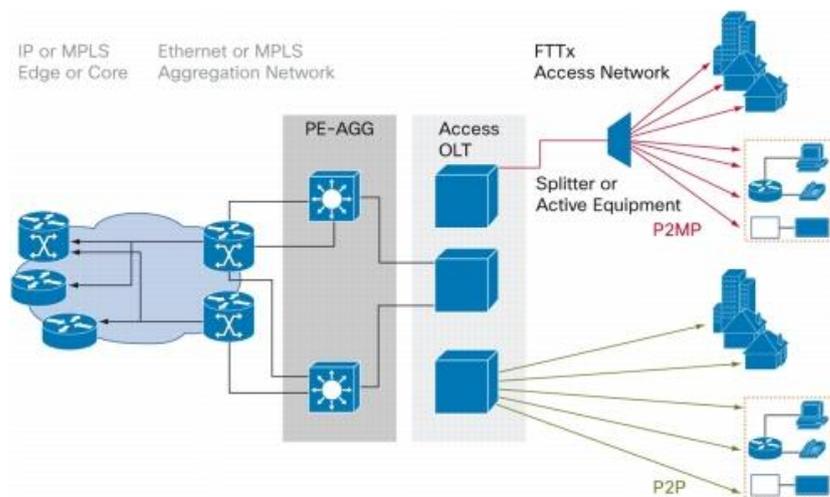


Рисунок 1.11 – Топологии технологии FTTH

Это агрегации устройство может быть также просто, как пассивный оптический сплиттер, или он может представлять активное устройство: коммутатор Ethernet или DSLAM. В отличие от этого, топология P2P использует специализированные волокна на всем пути между POP и клиентом.

Технологии, используемые на волокне можно разделить на три основные категории: Ethernet; TDM-PON и WDM-PON. Как показано в таблице 1.2, почти любые сочетания топологии и технологии в настоящее время используется, за исключением WDM-PON в P2P топологии. В любом случае, WDM-PON-прежнему рассматривается как незрелая, нестандартная технология, которая слишком дорого обходится для широкого развертывания в жилом рынке [14].

Таблица 1.2 – Категории FTTH

| Топология | Ethernet        | TDM-PON (GPON, EPON, DPON, XG-PON, 10GEPON) | WDM-PON |
|-----------|-----------------|---|---------|
| P2P       | Ethernet P2P    | PON P2P                                     | -       |
| P2MP      | Active Ethernet | PON P2MP                                    | WDM-PON |

Инфраструктура, основанная на оптическом волокне способна обеспечить скорость передачи данных, необходимую для Triple Play услуг, таких как высокоскоростной доступ в Интернет, VoIP и HD IPTV. Одним из основных компонентов при этом является, коммутаторы Ethernet с поддержкой VLAN, QoS, функции IGMP L2, а также надежные настройки безопасности, чтобы облегчить поставщику услуг построение управляемой и безопасной сети доступа FTTH (рисунок 1.12) [15].

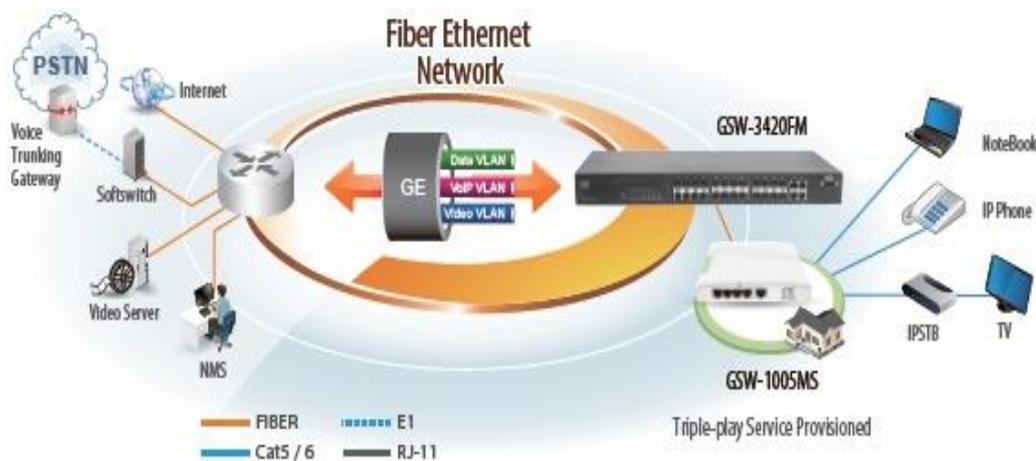


Рисунок 1.12 – Пример построения Ethernet FTTH

#### 1.4 Технология Ethernet FTTH

В технологиях доступа в последнее время наметилась интеграция технологии Ethernet с различными технологиями DSL (гибридный Ethernet). Наиболее известным вариантом такой интеграции является технология EoV. При скорости передачи порядка 10 Мбит/с сеть Ethernet может располагаться на расстоянии до 1,5 км от узла доступа, а при скоростях 3-4 Мбит/с это расстояние возрастает до 3-4 км. Стандарт на EoV разрабатывается в IEEE (IEEE 802.3ah) как EFM (Ethernet in the First Mile) в двух вариантах [16, 17]:

- EFMC (EFM Copper), имеющий характеристики обслуживания, аналогичные EoV;
- EFMF (EFM Fiber), обеспечивающий скорость передачи от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с на расстояние в несколько десятков километров до узла доступа.

В решении Ethernet FTTH для коммутации линий подразумевается использование коммутаторов с оптическими портами или оптическими трансиверами.

В основе первых европейских проектов сетей Ethernet FTTH лежала архитектура, при которой коммутаторы, расположенные на цокольных этажах многоквартирных домов, были объединены в кольцо по технологии Gigabit Ethernet. Кольцевая структура обеспечивала прекрасную устойчивость к различного рода повреждениям кабеля и была весьма рентабельной, но к ее недостаткам можно было отнести разделение полосы пропускания внутри каждого кольца доступа (1 Гбит/с), что давало в перспективе сравнительно небольшую пропускную способность, а также вызывало трудности масштабирования архитектуры [18].

Затем широкое распространение получила архитектура Ethernet типа «звезда» (рисунок 1.13).

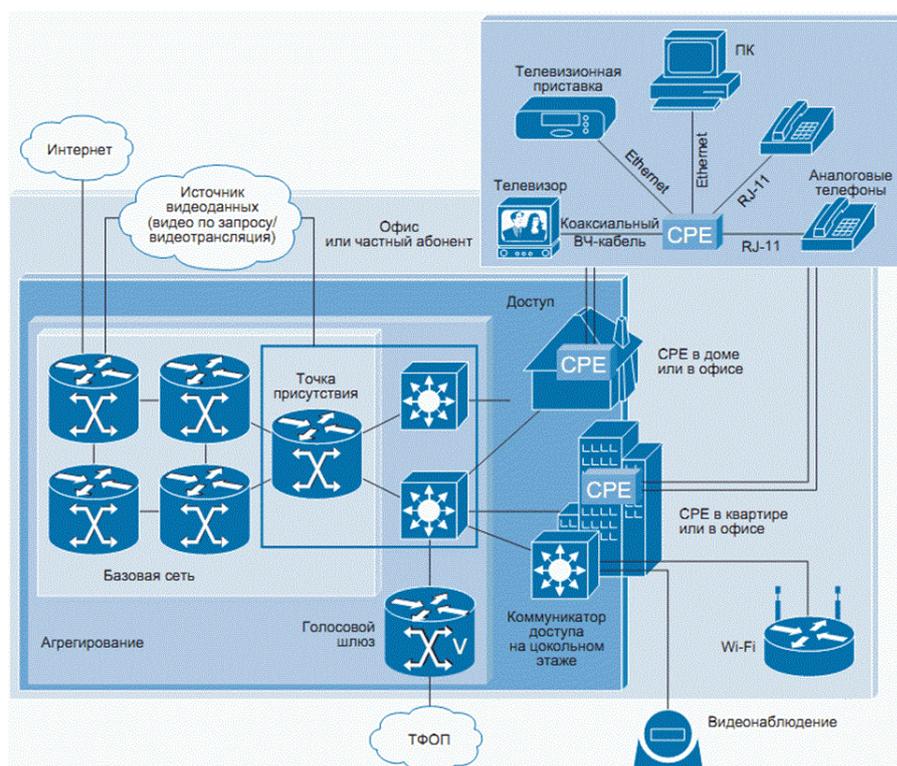


Рисунок 1.13 – Архитектура сети Ethernet FTTH типа «звезда»

Такая архитектура предполагает наличие выделенных оптоволоконных линий (обычно одномодовых, одноволоконных линий с передачей данных Ethernet по технологии 100BX или 1000BX) от каждого оконечного устройства к точке присутствия (point of presence, POP), где происходит их подключение к коммутатору. К портам коммутатора подключаются устройства конечных пользователей. Такой подход обеспечивает высокий уровень надежности за счет возможности резервирования оптических каналов, и обеспечивает преемственность с существующей «медной» инфраструктурой [19].

Преимущества решений Ethernet FTTH перед архитектурой на базе PON в соответствии с [19] является:

- практически неограниченная дискретная полоса пропускания, что позволяет достичь максимальной гибкости в наращивании предоставляемых сервисов в будущем, когда потребность в пропускной способности возрастет. Архитектура Ethernet FTTH позволяет провайдеру гарантировать каждому абоненту необходимую пропускную способность и создавать в сети индивидуальные профили полосы пропускания для каждого клиента;

- большой радиус действия. В типовых конфигурациях сетей доступа Ethernet FTTH использует технологию 100BX или 1000BX, с заданным максимальным радиусом действия 10 км. Для работы на больших расстояниях имеются оптические модули, позволяющие увеличить мощность оптического сигнала, а также оптоволоконные пары с оптическими модулями, которые можно подключить к порту любого Ethernet- оборудования;

- гибкое масштабирование сети. В случае появления новых абонентов можно добавить дополнительные карты Ethernet с высокой степенью модульности. Напротив, при использовании архитектуры на базе PON подключение первого абонента к оптическому дереву требует наличия наиболее дорогостоящего порта OLT, а при добавлении абонентов к тому же дереву PON стоимость подключения каждого абонента только увеличивается за счет приобретения ONT;

- технологическая независимость оптико-волоконного канала. Хотя текущие конфигурации Ethernet FTTH могут использовать технологию Gigabit Ethernet, она может стать неактуальной в течение последующих 30-40 лет. Однако одномодовая оптоволоконная линия является средой, способной поддерживать любую новую технологию передачи. В отдельных случаях для подключения корпоративных абонентов используются оптоволоконные технологии, например SONET/SDH или Fibre Channel. Эти технологии могут быть легко развернуты по тем же оптоволоконным линиям, что и Ethernet FTTH, с использованием той же Ethernet-платформы агрегирования;

- гибкое масштабирование скорости обслуживания абонентов. Поскольку одномодовые оптоволоконные линии не зависят от используемой технологии и скорости передачи данных, можно легко увеличить скорость для одного абонента, не влияя на работу других. Это означает, что абонент, использующий технологию Fast Ethernet, может перейти на Gigabit Ethernet за счет переключения оптоволоконной линии абонента на другой порт коммутатора и замены только Ethernet-устройства абонента;

- отделение абонентских линий – это свойство, присущее архитектурам Ethernet FTTH. Реализация принципа отделения абонентских линий явилась главным критерием выбора технологии FTTH некоторыми компаниями в Европе, поскольку они стремились построить сети, где доступ к инфраструктуре оптоволоконной сети доступа могли бы иметь несколько провайдеров;

- безопасность обеспечивается за счет того, что выделенная оптоволоконная линия является защищенной средой на физическом уровне. Кроме того, коммутаторы Ethernet, используемые у провайдеров, призваны обеспечить разделение физического уровня портов и логического уровня абонентов и имеют функции защиты, которые в состоянии предотвратить попытки вторжений.

В связи с ростом потребностей в широкополосных услугах повсеместно вводятся оптические технологии в сеть доступа. Оптические технологии доступа мультисервисной сети должны обеспечить полный диапазон всех известных в настоящее время и ожидаемых в будущем услуг для существующих абонентов и бизнес-потребителей.

К недостаткам Ethernet FTTH можно отнести узкую полосу пропускания и недостаточные возможности масштабирования телекоммуникационного ресурса [20].

## **1.5 Требования, предъявляемые к сети доступа**

Построением глобального информационного общества обеспечивается за счет развития и совершенствования архитектуры сетей доступа и систем телекоммуникаций с целью предоставления услуг звукового и телевизионного вещания, IP-телефонии, высокоскоростного обмена данными между пользователями и другие услуги обрабатываемыми опорной пакетной сетью. При этом важной частью этой сетевой инфраструктуры является широкополосная оптическая сеть доступа. Необходимая пропускная способность сети доступа обусловлена развитием системы телевидения высокой четкости, для которого нужны широкополосные каналы и высокая скорость обмена данными в Интернет [21]. Поэтому трансформация функций, возложенных на сеть абонентского доступа является причиной, которыми обусловлены существенные изменения функций, выполняемых сетью доступа, заключаются в главных тенденциях развития всей системы электросвязи:

- интеграция, затрачивающаяся сети связи, телекоммуникационные услуги, эксплуатационные процессы и т.п.;
- интеллектуализация, подразумевающая использование новых технологий электросвязи и в информатики;
- персонализация, ориентированная на максимальное “приближение” средств электросвязи к конкретному человеку;
- поддержка услуг по обмену видеоинформацией, стимулирующая существенное повышение пропускной способности сети абонентского доступа.

## **1.6 Исследования трафика сигналов в проводных сетях при использовании распространенных протоколов Ethernet, ОКС 7, VoIP, TSP**

В источнике [22] приведены сведения о том, что многочисленные исследования за последнее десятилетие учеными разных стран утверждают о проявлении свойства самоподобия телетрафика. В этом трафике есть пульсации и они повторяются на разных масштабах времени на фоне низкого среднего уровня. Эти особые свойства современного трафика могут влиять на показатели качества обслуживания такие как задержка и джиттер при прохождении самоподобного трафика через сеть. Самоподобные процессы относятся к процессам с долговременной памятью. Самоподобной (фрактальной) структурой обладает трафик в проводных сетях при использовании распространенных протоколов Ethernet, ОКС 7, VoIP, TSP и др. Так как в основе современных технологий передачи данных лежат связи типа клиент-сервер и клиент-клиент (peer – to – peer).

Точнее все современные услуги передачи данных построены на архитектуре клиент-сервер. При этом клиент стал унифицированным и

одинаковым для всех услуг. И именно протокол обмена данными между клиентом и сервером определяет процедуру предоставления услуги, а полученные данные – содержимое соответствующей услуги. При обращении к службе Web используется протокол HTTP стека TCP/IP. Происходит смена тенденции технологии Web от фиксированных сайтов на основе языка HTML к динамическим сайтам версии HTML-XML и других языков программирования.

Динамический сайт это распределенная база данных, формирующая для пользователя страницу информации в соответствии запроса. Следующая тенденция состоит в конвергенции Web-технологий, состоящая в передаче видеoinформации. Это анимации, музыкальные вставки, графика в режиме реального времени, видеовставки и различные калькуляторы с решениями соответствующих задач и построением соответствующих графиков. А также тенденция перехода к новой концепции Web 2.0.

Под широкополосными понимаются приложения и услуги, отличные от традиционных. К традиционным услугам относятся передача речи, данных и организация выделенных каналов. Широкополосные услуги и приложения по назначению можно разделить на две группы:

- услуги, которые используются в деловых и практических целях (электронный бизнес, телемедицина, видеоконференц-связь, удаленное обучение, удаленный домашний офис, высокоскоростной доступ в Интернет, осуществление on-line-платежей и т.д.);

- приложения и услуги развлекательного характера (игры в режиме on-line, интерактивное телевидение, видео по требованию, цифровое вещание и т.п.).

Сегодня пользователь использует услуги:

- электронная почта;
- «скачивание» видео- и аудио-файлов;
- мобильная торговля в Интернет;
- мобильные игры;
- слежение за передвижением грузов;
- слежение за детьми, пожилыми людьми, животными;
- бизнес-приложения и другие.

Следовательно, можно сказать, что мультисервисная сеть, имеющая опорную пакетную сеть, при предоставлении различных услуг возможно возникновение трафика с пиками нагрузки. Для сглаживания этих пик в сетевых устройствах (коммутаторах) оптического доступа имеются буферы портов.

В [23, 24] описывается, что методы расчета пропускной способности, емкости буферов портов сетевых устройств, основанные на марковских моделях и формулах Эрланга могут в условиях самоподобного телетрафика могут привести к снижению показателей качества обслуживания. Эти модели были разработаны в хорошо изученных телефонных сетях, где преобладал моносервисный трафик – голос.

Самоподобный характер трафика, наблюдаемый в современных высокоскоростных сетях связи, обусловлен тем, что сети являются интегральными и используются для передачи речи, данных, изображений (в том числе факс), файлов и других видов информации, представленных в виде форме стандартизированных пакетов. Такой трафик оказывает влияние на характеристики систем связи [25].

### 1.7 Исследования случайных процессов в сетях доступа

Случайный самоподобный процесс – это дискретная последовательность случайных величин (аргументом считается порядковый номер единицы времени)  $X = \{X_t : t = 0, 1, 2, \dots\}$  [26]. При этом делается предположение, что все рассматриваемые случайные процессы относятся к стационарным случайным процессам с ограниченной ковариацией, т. е.  $Cov(X_t, X_{t+k}) = \overline{(X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})} < +\infty$ , с дисперсией  $D(X) = \overline{(X_t - \bar{X})^2} = \sigma^2$  и автокорреляционной функцией  $r(k) = \frac{Cov(X_t, X_{t+k})}{D(X)}$ .

Для того чтобы описать принадлежность процесса к классу процессов, имеющих долгосрочную зависимость или самоподобие, необходимо рассмотреть агрегированные из него процессы, построенные с помощью усреднения значений исходного процесса на непересекающихся временных интервалах  $X^{(m)} = \{X_k^m : k = 0, 1, 2, \dots\}$ , при этом агрегированные процессы также будут стационарны и имеют ограниченную ковариацию

$$X_k^m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{(k-1)m+i} \quad (1.1)$$

В. И. Нейман в своей работе "Три источника и три составные части теории самоподобных процессов" описал, что свойства самоподобного случайного процесса выражены в медленном убывании дисперсии, долгосрочной зависимости и флуктуационном характере спектра мощности [27].

Убывание дисперсии асимптотически описывается соотношением [26, 28, 29, 30]

$$D(X^{(m)}) \approx am^{-\beta}, 0 < \beta < 1, m \rightarrow \infty. \quad (1.2)$$

т. е. вариация агрегированных процессов – средних выборок – уменьшается медленнее, чем величина, обратная размеру выборки.

Долгосрочной зависимостью в самоподобных процессах называют наличие расходимости автокорреляционной функции процесса:

$$\sum_k r(k) = \infty, r(k) \approx k^{-\beta}. \quad (1.3)$$

Это означает, что спад автокорреляционной функции происходит гиперболически медленно.

Под флуктуационном характере спектра мощности понимают аналогию со спектром мощности флуктуации электронного потока:

$$f(w) \approx cw^{-\gamma}, w \rightarrow 0, \gamma = 1 - \beta, \quad (1.4)$$

где  $f(w) = \sum_k r(k) e^{-iwk}$ .

Наличие перечисленных выше свойств у случайного процесса означает, что его автокорреляционная функция совпадает с автокорреляционными функциями агрегированных процессов точно  $r(k) = r^m(k)$  или асимптотически  $r(k) \rightarrow r^m(k), m \rightarrow \infty$ .

Вышеописанные соотношения и определяют название самоподобного процесса: корреляционные свойства такого процесса, усредненного на различных временных интервалах, остаются неизменными.

Важнейшим параметром, характеризующим "степень" самоподобности случайного процесса, является параметр Хёрста (Hurst).

Величина показателя Хёрста  $H$  лежит в интервале  $0,5 < H < 1,0$ . Для процессов, не обладающих свойством самоподобия, величина параметра Хёрста равна 0,5. Для самоподобных процессов с долгосрочной зависимостью этот параметр изменяется в пределах 0,7-0,9. Параметр  $\beta$ , который был введен для задания асимптотических свойств характеристик самоподобных случайных процессов определяется через параметр Херста:

$$\beta = \frac{1-H}{2}. \quad (1.5)$$

Простейшими самоподобными процессами являются фрактальное броуновское движение и фрактальный гауссовский шум.

## 1.8 Качество обслуживания широкополосной сети

Высокая активность пользователей современных широкополосных телекоммуникационных сетей, предоставляющих различным категориям пользователей широкий спектр услуг связи, обуславливает необходимость передавать максимальное количество сообщений с заданным качеством.

Потоки, циркулирующие в широкополосной сети, характеризуются неоднородностью и существенной нестационарностью. Они представляют собой сумму определенного множества потоков, поступающих в сети доступа из различных вторичных сетей связи:

- потоки требований на установление соединений (в т.ч. виртуальных) для речевого обмена (телефонные сети, сети на технологии ISDN и т.д.);

- потоки сообщений и пакетов (сети передачи данных, документального обмена, обмена данными) как в режиме дейтаграммной передачи, так и в режиме установления виртуальных соединений, потоки мультимедиа информации, характеризующиеся пачечным характером трафика [31].

Подобное поведение трафика в сети исследуется с помощью самоподобных процессов.

В работах [29, 30, 31, 32] приведены подробные доказательства структуры самоподобного трафика, появляющегося вследствие объединения новых и существующих технологий передачи и коммутации с разнородными потоками сервисов и приложений, а также причины появления самоподобных свойств. Следствием этих факторов является выраженная пачечность интенсивности трафика.

Коэффициент пачечности соответствует отношению пиковой интенсивности процесса поступления заявок на обслуживание к его среднему значению. Появление мощных пиковых скачков интенсивности в часы наибольшей нагрузки вызывает значительные потери пакетов и появление длительных задержек в сети, что сказывается на качестве обслуживания пользователей.

В [33] описано о эволюции требований по качеству обслуживания QoS в сетях связи. Планирование аналоговых сетей осуществлялось на базе моделей с потерями с использованием для расчета формулы Эрланга.

Появление концепции сетей NGN [34] привело не только к пакетизации ССОП, но и к тому, что сеть стала гетерогенной со множеством приложений, потребовавших к тому же дифференциации классов и параметров QoS [35]. Кроме того, уже в последние годы в дополнение к имеющейся метрике QoS добавилась еще одна – качество восприятия (QoE – Quality of Experience), определяющее субъективную оценку пользователем, например, качество видео [36]. В таблице 1.3 приведены требования к параметрам QoS для различных классов обслуживания, согласно рекомендации Y.1541 МСЭ-T, в которой применены сокращения: IPTV – задержка передачи пакетов, IPDV – вариация задержки, IPLR – доля потерянных пакетов, IPER – доля пакетов, переданных с ошибками.

Таблица 1.3 – Классы и параметры QoS

| Параметр QoS | 0         | 1         | 2         | 3         | 4         | 5   |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| IPTV, мс     | 100       | 400       | 100       | 400       | 1         | Нет |
| IPDV, мс     | 50        | 50        | Нет       | нет       | нет       | Нет |
| IPLR         | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | Нет |
| IPER         | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | нет |

Внедрение таких новых услуг, как игры в реальном времени и e-health, требует существенно меньших задержек, чем при передаче речи поверх IP.

Для гигабитной сети в [33] построен график результатов моделирования (рисунок 1.14).

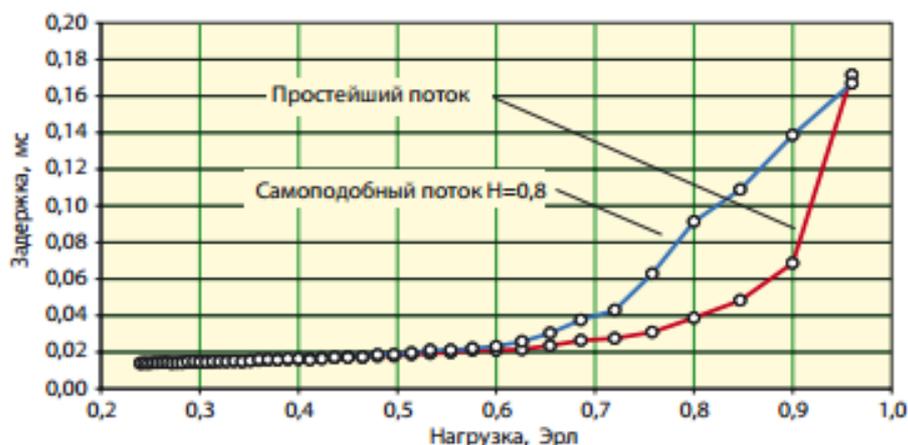


Рисунок 1.14 – Зависимость задержки от загрузки различных потоков

На основании вышеприведенного рисунка видно, что при загрузке самоподобного трафика задержки начинают расти уже при загрузке системы на 70% и более.

В первой главе проведен анализ технологий оптического доступа. Переход к NGA обусловлен необходимостью предоставления различных услуг пользователю. Осуществлены сравнительные характеристики оптических технологий доступа. В технологиях доступа в последнее время наметилась интеграция технологии Ethernet с различными технологиями DSL (гибридный Ethernet).

## 2 Экспериментальная часть

### 2.1 Метод оптической рефлектометрии

В настоящее время при измерении затухания волоконно-оптического тракта ВОЛС используется метод оптической рефлектометрии и метод вносимых потерь. Во втором случае значение затухания ВОТ определяется по отношению оптических сигналов на входе и выходе тракта. При этом оборудование (оптический тестер) является простым и дешевым, а затухание ВОТ определяется надежно и с хорошей точностью.

Однако, при необходимости более детального анализа состояния волоконно-оптического тракта используются рефлектометрические методы. Рефлектометрические методы обеспечивают проверку целостности оптического волокна, измерение длины оптического волокна, определение расстояния до места неоднородности (обрыва) оптического волокна, определение величины потерь в местах неоднородности оптического волокна

(неразъемных и разъемных соединителей), контроль процесса монтажа (сварки) оптических кабелей, определение затухания и коэффициента затухания оптического волокна и др.

Оптические рефлектометры, предназначенные для строительства и паспортизации волоконно-оптических линий связи, имеют большой динамический диапазон, большее разрешение и малую погрешность измерения затухания и расстояния.

Оптические рефлектометры, предназначенные для эксплуатации волоконно-оптических линий связи, имеют меньший динамический диапазон и разрешение, так как используются, в основном, для отыскания серьезных повреждений.

Все оптические рефлектометры имеют собственное программное обеспечение для занесения измеренных параметров магистрали во внутреннюю память или гибкий магнитный диск с возможностью распечатки результатов измерений на внешний (встроенный) принтер.

Усовершенствование оптических рефлектометров идет в направлении увеличения динамического диапазона, длины измеряемого оптического волокна, разрешения по расстоянию и затуханию, объема памяти и других сервисных функций.

Измерения можно проводить с одного конца волоконно-оптического тракта, а результаты измерений наглядно представлять в графическом виде (рис.2.1).

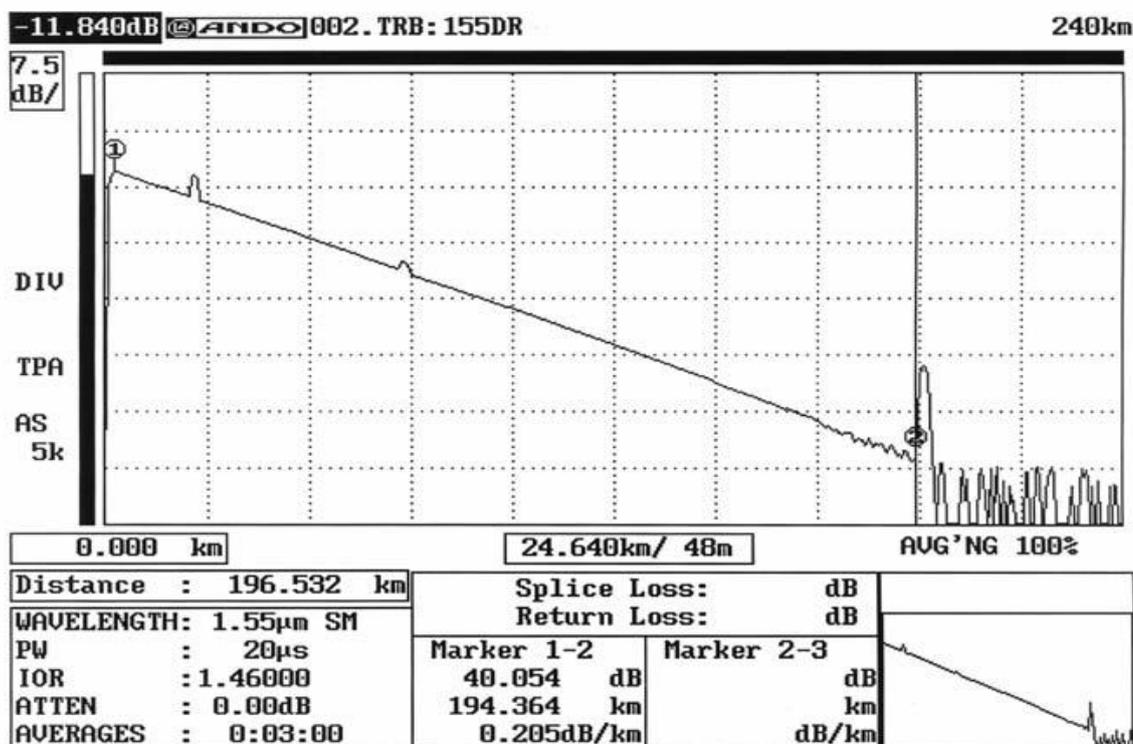


Рисунок 2.1 - Рефлектограмма волоконно-оптического тракта длиной 200 км

Основными достоинствами методов оптической рефлектометрии являются: большая информативность (измеряется распределение затухания вдоль ВОЛС); необходимость доступа к одному входу ВОЛС; результаты измерения в меньшей степени зависят от условий ввода зондирующего излучения в тестируемую ВОЛС.

Метод оптической рефлектометрии позволяет эффективно измерять все основные параметры волоконно-оптического тракта ВОЛС. Важнейшим преимуществом рефлектометрического метода является возможность обнаруживать и анализировать неоднородности волоконно-оптического тракта, что в условиях эксплуатационного обслуживания позволяет не только обнаруживать неисправности, но прогнозировать их

## **2.2 Оценка затухания в пассивных оптических сетях при различных неоднородностях**

В данном разделе отражены результаты проведенных экспериментальных исследований измерения параметров оптического кабеля для различных длин волн, в частности при 1310 и 1550 нм, при которых обнаруживаются различные неоднородности, а также сравнительном анализе полученных результатов.

Эксперименты проводились при использовании пассивной разветвленной СД и всего одного приёмопередающего модуля в OLT (Optical Line Terminal) для передачи информации множеству абонентских устройств ONT (Optical Network Terminal) или ONU (Optical Network Unit) и приёма информации от них. Измерения проводились с помощью оптического рефлектометра в работающей сети PON на длинах волн 1310 нм и 1550 нм .

Оптический рефлектометр определяет местонахождение дефектов и повреждений, измеряет уровень потерь сигнала в любой точке оптического волокна. Все, что нужно для работы с оптическим рефлектометром—это доступ к одному концу волокна.

Измерения проводилось только в поврежденной ветви сети: от последнего разветвителя до ONU на расстоянии около 35 км от начала линии.

На рисунке 2.2 представлен схема измерения сигнала в PON

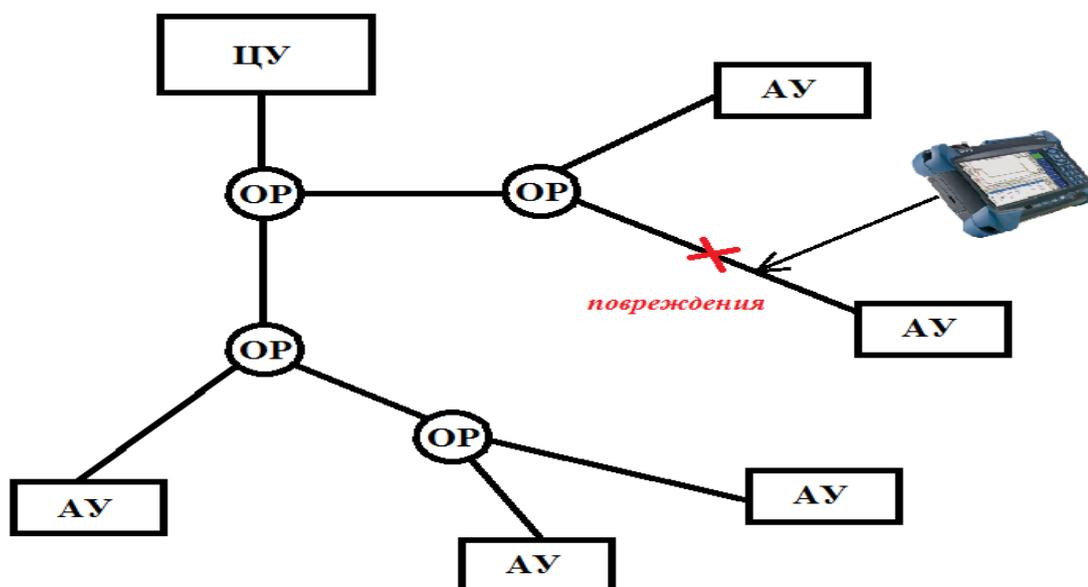


Рисунок 2.2 – Схема измерения сигнала в PON

Из рисунка 2.2 видно, что при измерении использовались: ЦУ (центральный узел), 4 ОР (оптический разветвитель), 5 АУ (абонентский узел) и рефлектометр.

На рисунке 2.3 представлена оптическая рефлектограмма (зависимость затухания от расстояния)

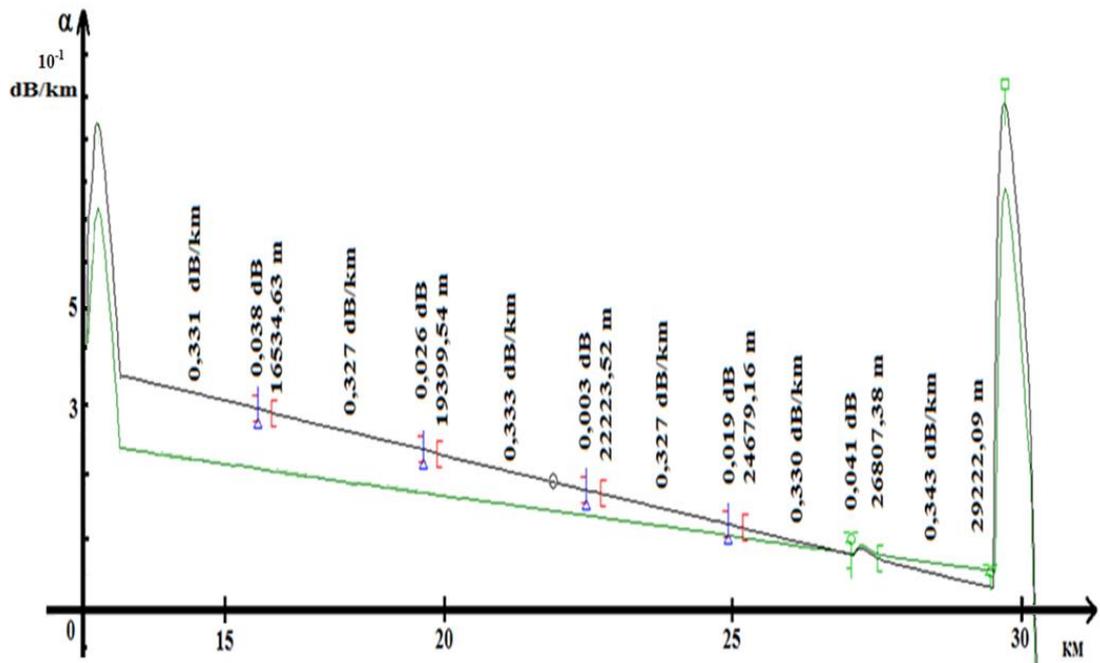


Рисунок 2.3 – Зависимость затухания от расстояния представлены также неоднородности вдоль линии

Из рисунка 2.3 видно, что на обрезке от 25307 м до 28201 м значительное изменение неоднородностей.

На рисунке 2.4 приведен сравнительный график измерений для различных длин волн (850 нм, 1310 нм, 1550 нм).

На рисунке 2.4 видно, что при измерении оптического волокна для различных длин волн разница потерях незначительна.

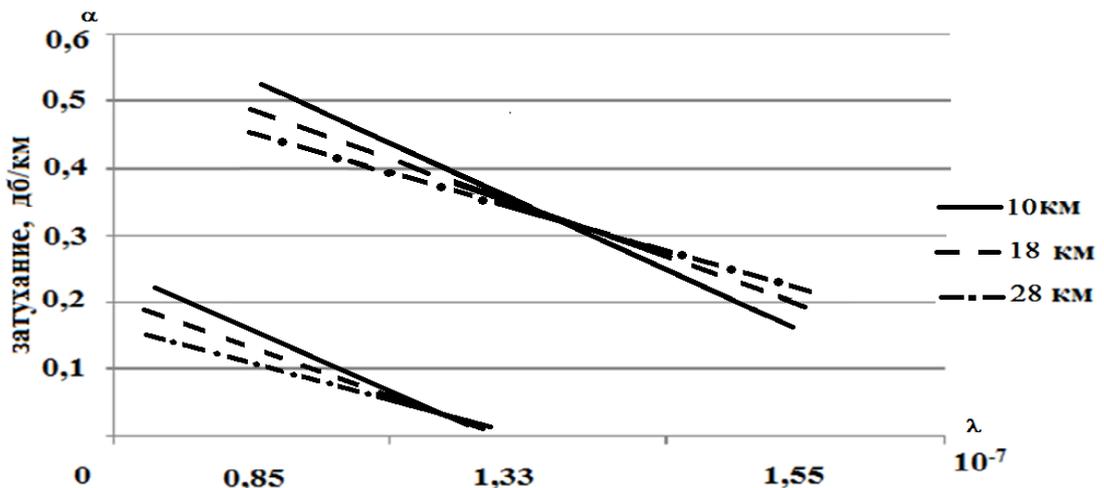


Рисунок 2.4 – Сравнительные характеристики коэффициента затухания от длины волны для различных расстояний

При измерении параметров волокна для различных длин волн разница в потерях незначительна при использовании оптического оборудования на

коротком расстоянии. Рефлектометрические измерения позволяют определить положения неоднородностей.

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Расчет показателей качества обслуживания широкополосной сети

В [39] описывается о возрастающей активности пользователей в широкополосной сети доступа, что обуславливает передачу максимального количества сообщений с заданным качеством. И о потребности исследования показателей качества обслуживания трафика (вероятность потери пакета, время задержки) необходимо исследовать для повышения производительности широкополосной сети доступа.

В работах [28, 29, 32, 40, 41, 42] описывается, что для описания трафика в широкополосных IP-сетях целесообразно использовать распределение Парето. При этом, распределение Парето, как и распределения Вейбулла и логнормальное, относится к распределениям с «тяжелым хвостом», которое обладает бесконечной дисперсией в диапазоне  $1 < \alpha < 2$ , где показатель « $\alpha$ » характеризует «тяжесть» хвостов распределения и определяет пачечную структуру процесса. Такие процессы считаются самоподобными. А в работе [43] описано, что поведение трафика широкополосной IP-сети можно охарактеризовать различными законами распределения, отличными от пуассоновского, в основном, законом Парето.

В работе [39] для представления математической модели расчета показателей качества вводится ограниченное распределение случайной величины, которое позволяет, не меняя формы распределения, указать ее минимальное и максимальное значения [44]. Если случайная величина  $x$  – размер блока данных, то диапазон изменений такой величины  $(0; L)$ , где  $L$  – максимально возможный размер блока (пакет или несколько пакетов), отличный от бесконечности. Тогда плотность распределения вероятности:

$$f(x) = \frac{\alpha}{k} \left( \frac{k}{x} \right)^{\alpha+1}, \quad x > 0. \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – параметр распределения Парето ( $0 < \alpha < 2$ ).

С помощью пределов интегрирования формула (2) принимает вид:

$$\int_k^L f(x) dx = 1. \quad (3.2)$$

где  $k$  – минимальный размер блока данных;

$L$  – максимально возможный размер блока, отличный от бесконечности.

Плотность распределения вероятности для ограниченного распределения Парето

$$f_{\text{огр}}(x) = \frac{\alpha \cdot k^\alpha}{1 - \left(\frac{k}{L}\right)^\alpha} \cdot x^{-\alpha-1}, k \leq x \leq L, 0 < \alpha < 2. \quad (3.3)$$

Тогда основные параметры распределения Парето будут иметь следующий вид:

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{(L^\alpha - k^\alpha)} \cdot \left( \frac{(L^2 \cdot k^\alpha - L^\alpha \cdot k^2)}{(2-\alpha)} - \frac{\alpha \cdot (L \cdot k^\alpha - L^\alpha \cdot k)^2}{(1-\alpha)^2 \cdot (L^\alpha - k^\alpha)} \right). \quad (3.4)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия функции распределения Парето.

Диффузионная аппроксимация является наиболее известным и широко применяемым методом приближенного расчета СМО при произвольных законах распределения входных процессов и процессов обслуживания. Идея метода заключается в аппроксимации дискретного случайного процесса (в данном случае – описывающего количество пакетов в узлах) непрерывным диффузионным процессом. Стоит отметить, что в области низких нагрузок данный метод дает заметную погрешность. Таким образом, для расчета показателей качества обслуживания системы с произвольным распределением (в данном случае – распределение Парето Р/Р/м) метод диффузионной аппроксимации может использоваться, если коэффициент вариации функции распределения случайной величины больше 1.

Расчет вероятности потери в узле доступа

В системе М/М/1/Ν вероятность переполнения буфера определяется на основе процессов гибели и размножения:

$$P_{\text{loss}} = \frac{1-p}{1-p^{N+1}} \cdot p^N. \quad (3.5)$$

Осуществим исследование переполнения буфера порта коммутатора при емкости Ν равном 4 (рисунок 3.1).

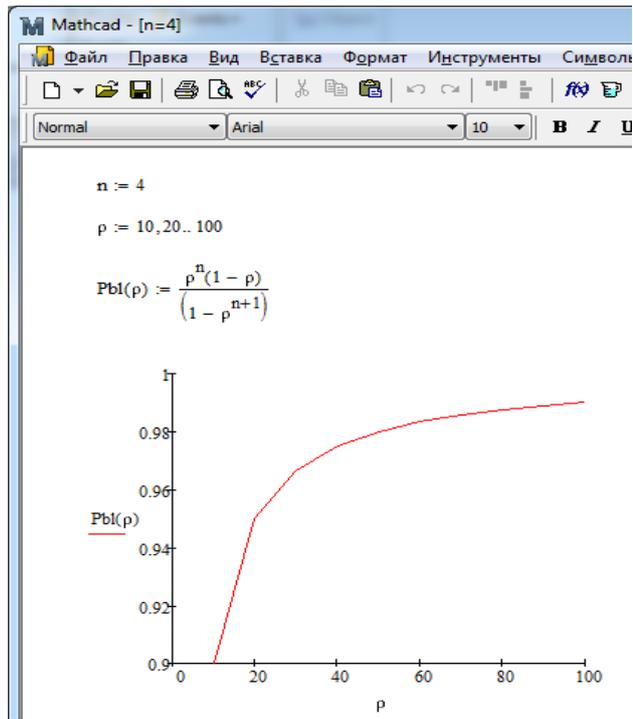


Рисунок 3.1 – Вероятности потерь от загрузки системы при N равном 4  
 На рисунке 3.2 представлены зависимости вероятности потерь как функция размера буферного пространства коммутатора при разных коэффициентах использования системы  $\rho$ .

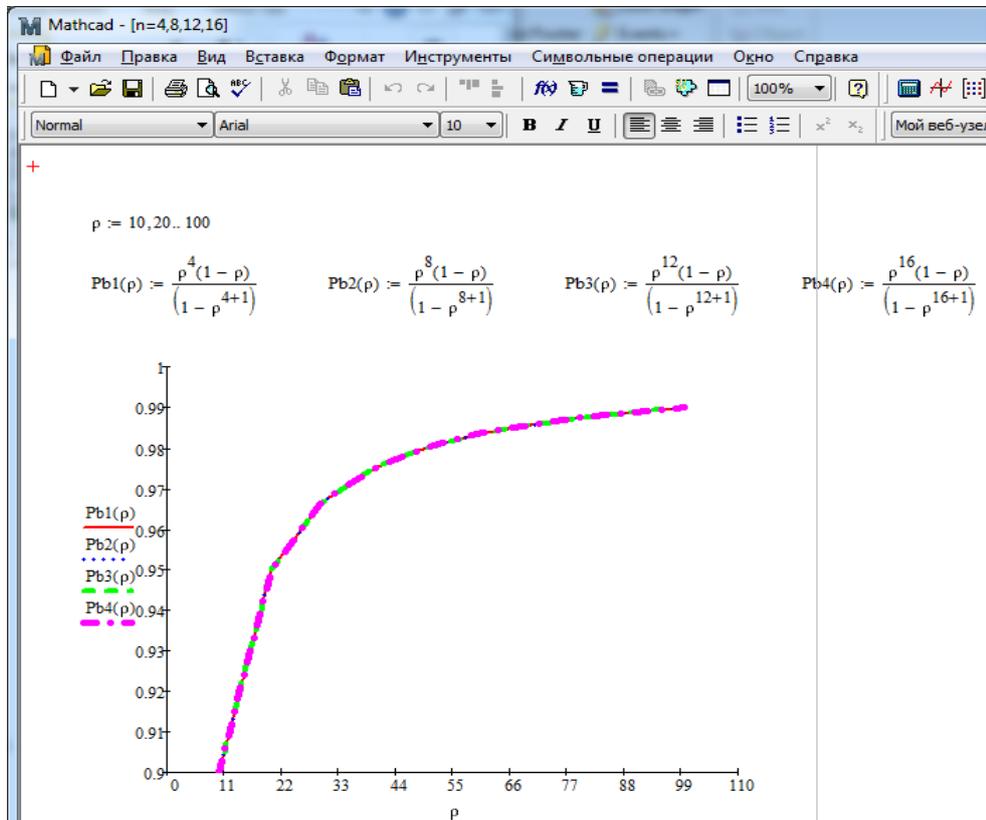


Рисунок 3.2 – Вероятности потерь от загрузки системы при

$N=4, 8, 12$  и  $16$

При условии, если  $p^N \ll 1$  для системы  $M/M/1/N$  может быть использована следующая аппроксимация:

$$P_{loss} \approx p^N. \quad (3.6)$$

Необходимый размер буфера в узле доступа можно определить исходя из вероятности потерь:

$$N \approx \frac{\text{Ln}(P_{loss})}{\text{Ln}(p)}. \quad (3.7)$$

Для расчета потерь в системах  $G/G/1/n$  при известных распределениях входящего потока предлагается использовать приближенную формулу, полученную на основе диффузионной аппроксимации

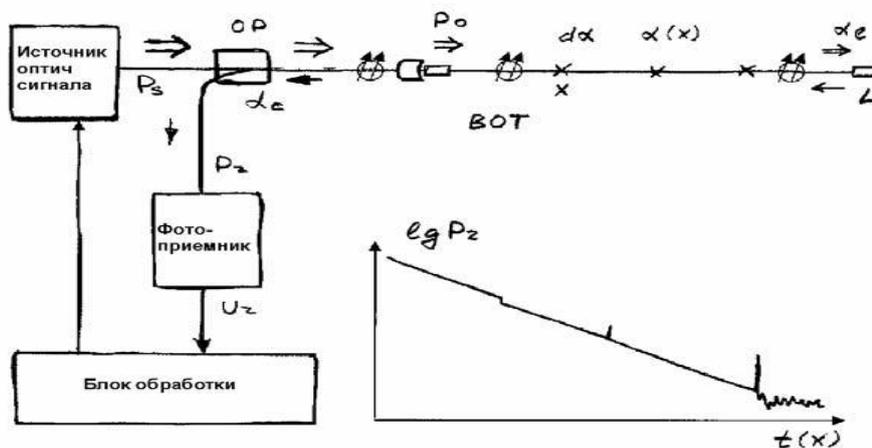
$$P_{loss} = \frac{1-p}{1-p \frac{2}{C_n^2+C_s^2} \cdot n \cdot b + 1} \cdot \frac{2}{p^{C_n^2+C_s^2}} \cdot nb. \quad (3.8)$$

где  $nb$  – размер буфера;  
 $p$  – нагрузка системы.

Величина потерь зависит от коэффициента вариаций и размера буфера порта.

### 3.2 Исследования сигналов с помощью метода оптической рефлектометрии

Принцип оптической рефлектометрии основан на зондировании исследуемого оптического волокна оптическим сигналом  $P_s$  и анализе отраженного в волоконно-оптическом тракте оптического сигнала  $P_r(t)$  (рис.3.3).



### Рисунок 3.3 – Метод оптической рефлектометрии

$P_s$  - зондирующий сигнал на выходе источника оптического сигнала

$P_o$  - зондирующий сигнал на входе ВОТ

$P_r$  - отраженный сигнал на входе приемника рефлектометра

$U_r$  - сигнал на выходе фотоприемника  $\square c$  - потери зондирующего и отраженных сигналов на оптическом разветвителе

$K$  - коэффициент преобразования фотоприемника

$G$  – коэффициент обратного рассеяния

$n$  – показатель преломления ОВ

Зондирующий сигнал  $P_x$  (рис.3.4) в тестируемом оптическом волокне изменяется за счет потерь:

$$P_x = P_o \exp(-\alpha x) = P_o 10^{-0.1\alpha x},$$

Где  $P_o$  – мощность зондирующего сигнала на входе оптического волокна;

$\alpha$  – коэффициент затухания (нП/м);

$\alpha$  – коэффициент затухания (дБ/м);

$x$  - расстояние от начала волокна.

$$\alpha = 0,23 \alpha$$

Потери оптического сигнала происходят за счет поглощения в материале оптического волокна и рассеяния на его неоднородностях. На расстоянии  $x$  от начала оптического волокна при  $\Delta x \ll x$  (рис.4) потери сигнала  $\Delta P$  равны:

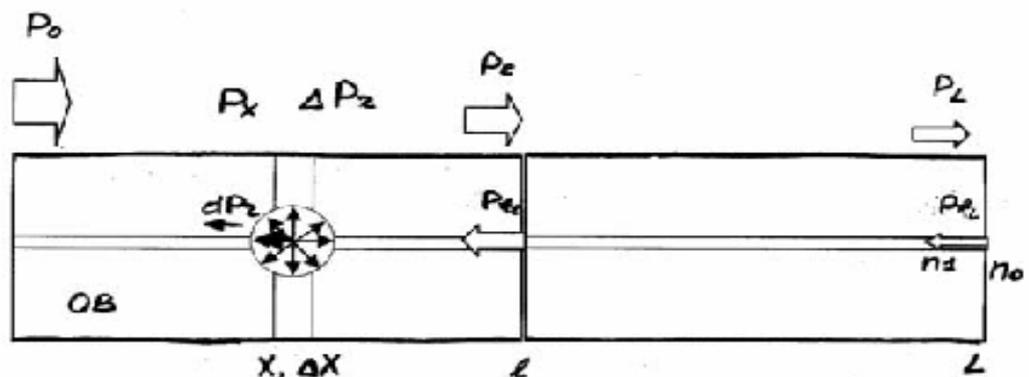
$$\Delta P(x) = P_x \alpha_r \Delta x + P_x \alpha_l \Delta x = \Delta P_r(x) + \Delta P_l(x),$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент затухания, связанный с рассеянием;

$\alpha_l$  – коэффициент затухания, связанный с поглощением;

$\Delta x$  – пространственное разрешение.

В настоящее время технология производства оптического волокна (ОВ) и оптического кабеля (ОК) обеспечивает минимальные потери связанные как с поглощением, так и с рассеянием. Составляющая потерь на рассеяние определяется рэлеевским рассеянием оптического сигнала на микрон неоднородностях оптического волокна.



### Рисунок 3.5 – Потери и обратное рассеяние сигнала в ОВ

Рэлеевский сигнал рассеивается изотропно. При этом часть рассеянного рэлеевского  $dPr$  сигнала  $\square Pr(\square x)$  захватывается оптическим волокном и распространяется в ОВ навстречу зондирующему сигналу  $Px$  (рис.4).

Величина обратно рассеянного рэлеевского сигнала  $dPr$  зависит от фактора обратного рассеяния  $S:dPr = \square P(\square x) S$

Фактор обратного рассеяния в основном зависит от числовой апертуры ОВ и примерно равен:

$S = - 30$  дБ для одномодовых волоконных световодов;

$S = - 23$  дБ для многомодовых волоконных световодов.

Можно ввести коэффициент обратного рэлеевского рассеяния, который зависит от длины участка ОВ -  $\square x$ , от затухания -  $\square r$  (составляющей, связанной с рассеянием) и от фактора обратного рассеяния –  $S$ :

$$Gr = \square x \square r S$$

$$\text{Тогда } Pr(x) = Gr Px$$

Мощность обратно рассеянного сигнала в ОВ пропорциональна мощности зондирующего сигнала в данной точке оптического волокна.

Таким образом, измеряя отраженный сигнал  $dPr(x)$ , можно восстановить эволюцию зондирующего сигнала  $Px$  и затем определить все необходимые параметры ВОТ: коэффициент затухания  $\square \square$  и его распределение вдоль

ВОТ  $\square(x)$ , суммарное затухание  $\square L$  и потери в соединителях  $d\square$ . Из распределения затухания определяются координаты неоднородностей, сварки и обрыва ОВ.

Для восстановления распределения сигнала  $Px$  в рефлектометрических методах отраженный сигнал измеряют с учетом задержки  $\square \square \square$  которую имеет отраженный сигнал относительно зондирующего с учетом про-

хождения зондирующего сигнала в прямом направлении и отраженного сигнала в обратном:

$$\square \square = 2nx/c,$$

где  $n$  - показатель преломления сердцевины ОВ;

$c$  – скорость света в вакууме;

$x$  – координата от начала ВОТ, соответствующая задержке.

Задержка отраженного сигнала в 10 нс соответствует расстоянию 1 м, 2.5 мс – 250 км (таблица 3.1).

Таблица 3.1 Задержка отраженного сигнала в ВОТ

|                        |       |         |       |        |        |        |        |
|------------------------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $\square \square 1$ нс | 10 нс | 0.1 мкс | 1 мкс | 10 мкс | 20 мкс | 1 мс   | 2.5 мс |
| X 0.1 м                | 1 м   | 10 м    | 100 м | 1 км   | 2 км   | 100 км | 250 км |

Итак, в методе оптической рефлектометрии в тестируемое ОВ вводят зондирующий оптический сигнал. Часть рэлеевского рассеянного сигнала отражается, и отраженный сигнал измеряется. Анализ отраженного сигнала в зависимости от задержки относительно зондирующего сигнала позволяет найти эволюцию оптического сигнала вдоль волоконно-оптического тракта, а затем все необходимые его параметры

### **3.3 Расчет параметров качества обслуживания сети с технологией доступа GPON**

Среди всех схем преимущественного разделения полосы пропускания наиболее эффективна в реализации схема, при которой вся полоса пропускания цифровой линии предоставляется на правах абсолютного приоритета мультимедийной нагрузке, а пакеты трафика Best Effort используют полосу, оставшуюся свободной от передачи мультимедийной нагрузки, ожидая при необходимости начала обслуживания в буфере [6]. Данная технология позволяет усилить эффект, достигаемый за счет статистического мультиплексирования, поскольку пакеты, задержанные из-за отсутствия свободной полосы пропускания, ожидают ее освобождения, а не уходят из системы.

На основе реализации принципов формализации процесса обслуживания нагрузки в виде пакетов, использующих значение меток MPLS, при рассмотрении процесса выделения соответствующего сетевого ресурса на уровне соединения была построена модель совместного занятия полосы пропускания нагрузкой мультимедийных приложений QoS и нагрузкой трафика Best Effort, а также приведены определения основных характеристик обслуживания нагрузки [6].

#### **Описание модели исследуемой сети**

В сети имеется четыре узла (маршрутизаторы), соединенные между собой цифровыми линиями. Обозначим через  $L$  общее число линий и будем считать их пронумерованными произвольным образом.

Пусть  $v_1$  – скорость первой линии ( $1=1, 2, \dots, L$ ), выраженная в основных передаточных единицах. Допустим, что по сети передаются  $N$  потоков мультимедийного трафика, анализируемых на уровне соединения. Пронумеруем имеющиеся потоки заповор на получение сервиса произвольным образом.

Каждый из обслуживаемых потоков (например  $k$ -й) характеризуется интенсивностью поступления требований на занятие полосы передачи  $\lambda_k$  средним временем удерживания выделенной полосы  $T_k$ , числом основных передаточных единиц, необходимых для обслуживания поступившего требования  $b_k$  и маршрутом следования пакетов от узла источника к узлу

получателю  $R_k$ , задаваемым последовательностью номеров соединительных линий (СЛ), составляющих маршрут  $R_k$ .

Заявка на получение мультимедийной услуги (видео по запросу) от  $k$ -го потока принимается к обслуживанию, если каждая из линий, составляющих маршрут следования нагрузки  $k$ -го потока, имеет свободными не менее  $b_k$  основных передаточных единиц. В противном случае заявка на услугу получает отказ и не возобновляется в форме повторной попытки.

Процесс обслуживания мультимедийных потоков будем характеризовать следующими величинами:  $r_k$  - доли сообщений  $k$ -го потока, получившие отказ в предоставлении услуги, и  $M_k$  - средняя величина полосы пропускания линии, выраженная в основных передаточных единицах и занятая сообщениями  $k$ -го потока [6].

Вычисление этих показателей облегчается, поскольку заявки на соединение для данного типа трафика имеют абсолютный приоритет в занятии полосы передачи СЛ. Следовательно, значения  $r_k$  и  $M_k$  могут быть найдены независимо от характеристик обслуживания нагрузки Best Effort.

Предположим, что  $\lambda_{d,l} = 0, l=1,2,\dots,L$ . Упрощенная подобным образом модель сети описывается марковским процессом  $r(t)=[i_1(t),\dots,i_N(t)]$ , у которого отсутствуют компоненты, связанные с наличием на передаче пакетов нагрузки Best Effort [6].

Для вероятностей стационарных состояний упрощенной модели выполняется свойство мультипликативного представления, позволяющее записать следующее выражение:

$$P(i_1\dots i_N) = P(0,\dots,0) \frac{a_1^{i_1}}{i_1!} \frac{a_2^{i_2}}{i_2!} \dots \frac{a_N^{i_N}}{i_N!}, \quad (3.9)$$

где  $(i_1,\dots,i_N) \in S$  – компоненты марковского процесса.

Наличие свойства мультипликативности послужило основой для нескольких алгоритмов точного вычисления  $r_k$  и  $M_k$ . По ряду показателей, среди которых необходимо отметить простоту реализации и возможность однотипного использования расчетной схемы для целого класса моделей, наиболее удачным следует признать сверточный алгоритм.

Для этой оценки пользуются методом просеянной нагрузки. Суть метода и его название становятся понятными при анализе рассуждений, положенных в его основу. Обозначим через  $\beta_1$  долю заявок на установление соединения, получивших отказ из-за недостаточности ресурса на 1-й СЛ. Если считать, выполненным предположение о том, что заявки на каждом звене сети блокируются независимо, то интенсивность нагрузки, поступающей на 1-е звено, можно считать пуассоновской и равной:

$$\Lambda_1 = \frac{1}{1 - \beta_1} \sum_{n \in R_n} a_n b_n \prod_{j \in R_n} (1 - \beta_j)^{b_n}, \quad (3.10)$$

где  $\beta_1$  – доля заявок на установление воедлинения.

Для вычисления доли потерянных заявок  $k$ -го потока на установление соединения использовать выражение:

$$r_k \approx 1 - \prod_{j \in R_k} (1 - \beta_j)^{b_k}, \quad (3.11)$$

где  $k = 1, 2, \dots, N$  – доля потерянных заявок.

Решением системы неявных уравнений является:

$$\beta_l = E \left( v_l, \frac{1}{1 - \beta_l} \sum_{n \in N_l} a_n b_n \prod_{j \in R_n} (1 - \beta_j)^{b_n} \right), \quad (3.12)$$

где  $l = 1, 2, \dots, L$  – скорость линии.

Его можно найти с помощью метода подстановок, начиная с нулевого начального приближения. Многочисленные исследования показали приемлемость данного подхода для приближенной оценки показателей обслуживания нагрузки QoS. По этой причине, а также благодаря простоте реализации, данный алгоритм будет использован при построении схемы вычисления характеристик обслуживания пакетов нагрузки Best Effort.

Ввиду сложности характера процесса обслуживания пакетов нагрузки Best Effort оценить в общем случае точные значения соответствующих показателей можно лишь с помощью техники имитационного моделирования. Был подготовлен соответствующий пакет программ, который применялся для оценки погрешности приближенных методов расчета показателей обслуживания нагрузки Best Effort. Точно рассчитать модель сети можно, упростив структуру и характер входного потока. Таким же образом можно исследовать модель сети, состоящей из одного звена, с одним потоком нагрузки QoS и потоком пакетов Best Effort [6].

Ее реализация основана на технике декомпозиции, Т.е. раздельном вычислении показателей обслуживания нагрузок QoS и Best Effort. Характеристики передачи нагрузки QoS можно находить независимо, поскольку заявки на установление соединения, составляющие данную нагрузку, обладают абсолютным приоритетом в занятии полосы передачи.

Рассмотренный отдельно процесс обслуживания соответствующих нагрузок обладает свойством мультипликативного представления стационарных вероятностей, что значительно облегчает построение точных и

приближенных методов расчета модели. Если предположить, что интенсивности нагрузки QoS равны нулю, то получаем модель с мультипликативным решением, но уже для числа пакетов, находящихся на передаче и ожидании. Пусть  $\gamma_1$  - суммарная интенсивность поступления пакетов на 1-ю линию СЛ. Значение  $\gamma_l$   $l=1, 2, \dots, L$  можно найти из решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \lambda_{d,1} + \gamma_1 p(1,1) + \gamma_2 p(2,1) \dots + \gamma_L p(L,1) \\ \gamma_2 = \lambda_{d,2} + \gamma_1 p(1,2) + \gamma_2 p(2,2) \dots + \gamma_L p(L,2) \\ \gamma_L = \lambda_{d,L} + \gamma_1 p(1,L) + \gamma_2 p(2,L) \dots + \gamma_L p(L,L) \end{cases} \quad (3.13)$$

Решение может быть получено методом подстановок с использованием соотношений реализуемых последовательно для  $l=1, 2, \dots, L$  с нулевого начального условия:

$$\gamma_1^{(m+1)} = \frac{1}{1 - p(1,1)} \left[ \lambda_{d,1} + \gamma_1^{(m+1)} p(1,1) + \gamma_2^{(m+1)} p(2,1) \dots + \gamma_{l+1}^{(m)} p(l-1,1) + \dots + \gamma_L^{(m)} p(L,1) \right]. \quad (3.14)$$

Задержка пакета на 1-й линии  $W_1$  определяется независимо от передачи пакетов на других линиях и находится из выражения, полученного для изолированного звена, состоящего из  $v_1$  основных передаточных единиц и бесконечного буфера. На звено поступает пуассоновский поток вызовов интенсивности  $\theta_1 = \gamma_1 / \mu_d$ .

Тогда

$$W_1 = \frac{v_1 E(v_1, \theta_1)}{(v_1 - \theta_1) \{v_1 - \theta_1 [1 - E(v_1, \theta_1)]\}} \quad (3.15)$$

Необходимо отметить, что это точное равенство выполняется только при отсутствии нагрузки QoS.

### 3.4 Оценка пропускной способности по заданной нагрузке

Рассмотрим использование разработанных расчетных процедур для решения задачи об оценке полосы пропускания (т.е. скорости передачи по СЛ) по заданной нагрузке.

Предположим известна топология сети, т.е. заданы узлы, установлены связи между ними в виде СЛ и определены маршруты следования нагрузок QoS и Best Effort. В форме маршрутной матрицы Q и матрицы переходов P. Необходимо определить скорости передачи СЛ, т.е. значения  $v_l$ ,  $l=1, \dots, L$ , при которых потоки нагрузки QoS будут обслужены с заданным качеством, а также указать возможную при этом максимальную интенсивность потоков нагрузки Best Effort. Зададим качество обслуживания нагрузки QoS долей

отказов на соединение и положим, что время задержки пакетов Best Effort не должно превосходить заданной величины [6].

При решении сформулированной задачи будем руководствоваться следующим алгоритмом. На первом его этапе, используя метод просеянной нагрузки QoS подберем скорости СЛ, при которых доли потерь нагрузки QoS не превосходят заданной величины. Поскольку нагрузка QoS имеет абсолютный приоритет в использовании полосы пропускания, то  $v_l, l=1, \dots, L$ , можно определить независимо от нагрузки Best Effort.

На рисунке 3.5 изображена схема исследуемой сети.

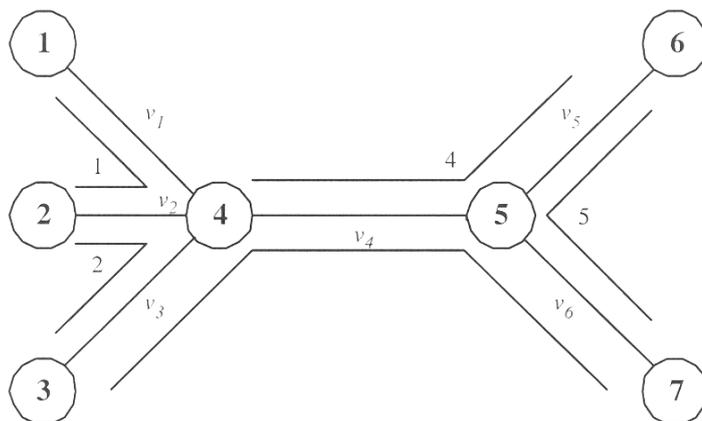


Рисунок 3.5 – Схема исследуемой сети

Согласно рисунку 3.5, в качестве начальных значений последовательности приближений к  $v_l$  можно взять целую часть от интенсивности суммарной нагрузки QoS, проходящей через линию  $v_l, l=1, \dots, L$ . Затем вычислить  $r(l), l=1, \dots, L$ , сравнивают с нормативными показателями. Если заданный уровень обслуживания не достигнут, то одна из скоростей увеличивается. Линия, на которой скорость увеличивается, выбирается путем сравнения приближенных значений потерь нагрузки  $\beta_l$  на каждом из звеньев. Увеличение скорости происходит на линии  $l$  с максимальными потерями  $\beta_l$ .

На втором этапе оценивается величина интенсивности потоков нагрузки Best Effort, которые могут быть переданы при ограничении на задержку. Эта часть задачи также решается подбором с помощью расчетной схемы, изложенной выше.

Допустим, имеется модель сети со следующими входными параметрами:

$$L=6, N=5,$$

$$\lambda_1 = 20, b_1 = 1,$$

$$\lambda_2 = 5, b_2 = 2,$$

$$\lambda_3 = 5, b_3 = 3,$$

$$\lambda_4 = 10, b_4 = 2,$$

$$\lambda_5 = 10, b_5 = 1,$$

$$\mu_k = 1, k = 1, \dots, 5,$$

$$\mu_{d,1} = 1, 1 = 1, \dots, 6.$$

Все необходимые расчеты произведем с помощью программного продукта Delphi 7. Блок-схема алгоритма расчета приведена в приложении В. Листинг программы расчета представлен ниже. В приложении Б

### 3.5 Результаты расчета

В таблице 3.1 показаны результаты вычислений характеристик обслуживания нагрузки QoS на первых 15 шагах реализации рекуррентного алгоритма определения скорости СЛ (номер варианта - это номер рекуррентного шага). Процесс сошелся на 45-м шаге. Предполагалось, что расчетные потери для всех пяти потоков не должны превосходить 5%. Поскольку метод просеянной нагрузки занижает величину потерь маршрутов с большим числом звеньев, то для учета этого явления рекуррентный процесс был остановлен, когда оценки потерь на маршрутах стали меньше 1 %. Найденные значения скоростей СЛ принимают значения  $v_1=31, v_2=43, v_3=41, v_4=54, v_5=43, v_6=42$ .

Таблица 3.2 – Результат вычисления характеристик обслуживания QoS

| Шаг | Емкость СЛ |       |       |       |       |       | Доли потерянных заявок нагрузки QoS |        |        |        |        |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|     | $v_1$      | $v_2$ | $v_3$ | $v_4$ | $v_5$ | $v_6$ | $r_1$                               | $r_2$  | $r_3$  | $r_4$  | $r_5$  |
| 1   | 20         | 30    | 25    | 35    | 30    | 25    | -0,1844                             | 0,1982 | 0,304  | 0,1975 | 0,13   |
| 2   | 22         | 30    | 25    | 35    | 30    | 25    | 0,1491                              | 0,2189 | 0,3009 | 0,1977 | 0,1306 |
| 3   | 22         | 32    | 25    | 35    | 30    | 25    | 0,1327                              | 0,1775 | 0,3073 | 0,1973 | 0,1293 |
| 4   | 24         | 32    | 25    | 35    | 30    | 25    | 0,1055                              | 0,1905 | 0,3052 | 0,1974 | 0,1297 |
| 5   | 24         | 32    | 25    | 35    | 32    | 25    | 0,1059                              | 0,1873 | 0,3162 | 0,163  | 0,1072 |
| 6   | 24         | 34    | 25    | 35    | 32    | 25    | 0,0902                              | 0,1541 | 0,3213 | 0,1624 | 0,1061 |
| 7   | 24         | 34    | 25    | 35    | 34    | 25    | 0,0905                              | 0,1511 | 0,3303 | 0,1358 | 0,0881 |
| 8   | 24         | 34    | 25    | 35    | 34    | 27    | 0,089                               | 0,1605 | 0,303  | 0,1437 | 0,0667 |
| 9   | 26         | 34    | 25    | 35    | 34    | 27    | 0,0698                              | 0,1677 | 0,3016 | 0,144  | 0,0669 |
| 10  | 26         | 34    | 27    | 35    | 34    | 27    | 0,0728                              | 0,1402 | 0,2786 | 0,1484 | 0,0701 |
| 11  | 26         | 36    | 27    | 35    | 34    | 27    | 0,0585                              | 0,1118 | 0,2822 | 0,1477 | 0,0696 |

|    |    |    |    |    |    |    |        |        |        |        |        |
|----|----|----|----|----|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 12 | 26 | 36 | 27 | 37 | 34 | 27 | 0,0581 | 0,1172 | 0,2629 | 0,1281 | 0,0775 |
| 13 | 26 | 36 | 27 | 37 | 36 | 27 | 0,0583 | 0,1152 | 0,27   | 0,1065 | 0,0632 |
| 14 | 26 | 36 | 27 | 37 | 36 | 29 | 0,0578 | 0,1222 | 0,2463 | 0,1127 | 0,0463 |
| 15 | 26 | 36 | 29 | 37 | 36 | 29 | 0,0596 | 0,0979 | 0,2249 | 0,1168 | 0,0486 |

На следующем этапе решения общей проблемы находим значения интенсивностей нагрузки Best Effort, которые сеть может обслужить при условии, что время задержки пакета на каждой линии не превосходит двух значений среднего времени передачи. Найденные величины интенсивностей принимают значения  $\lambda_{d,1} = 3$ ,  $\lambda_{d,2} = 3$ ,  $\lambda_{d,3} = 5$ ,  $\lambda_{d,4} = 3$ ,  $\lambda_{d,5} = 5$ ,  $\lambda_{d,6} = 7$ .

Поскольку решение задачи было получено приближенными методами, имеет смысл оценить погрешность решения с помощью средств имитационного моделирования.

Приведем рассчитанные подобным образом значения потерь нагрузки QoS и среднего времени задержки пакетов Best Effort для найденных значений скорости передачи  $\lambda_1$  и интенсивностей поступления пакетов  $\lambda_{d,1}$ ,  $l=1, \dots, 6$ . Соответствующие характеристики принимают значения:  $r_1 = 0,010561 \pm 0,0002$ ,  $r_2 = 0,028641 \pm 0,0005$ ,  $r_3 = 0,040401 \pm 0,0006$ ,  $r_4 = 0,028701 \pm 0,00046$ ,  $r_5 = 0,012591 \pm 0,0003$ ,  $T_1 = 1,2441 \pm 0,006$ ,  $T_2 = 1,3871 \pm 0,012$ ,  $T_3 = 1,3241 \pm 0,007$ ,  $T_4 = 1,3671 \pm 0,01$ ,  $T_5 = 1,2181 \pm 0,008$ ,  $T_6 = 1,1691 \pm 0,005$ .

На рисунке 3.6 представлены графики сходимости значения потерь нагрузки QoS.

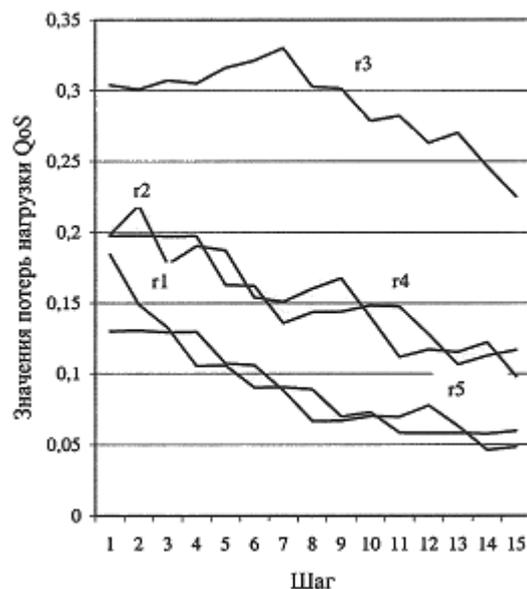


Рисунок 3.6 – Сходимость значений потерь нагрузки QoS

Таким образом, в соответствии с рисунком 3.6, значения скоростей передачи обеспечивают заданный уровень потерь заявок на соединение нагрузки QoS, а передача рассчитанных объемов нагрузки Best Effort удовлетворяет ограничению по задержке.

### 3.6 Расчет параметров надежности волокон в оптическом кабеле

Расчёт механической прочности оптических волокон

Надёжность оптических волокон находится в прямой зависимости от их механической прочности. Теоретическая прочность материала оптического волокна значительно больше получаемой на практике и должна составлять 1/10 от его модуля упругости – E. Однако, большинство волокон разрушаются при напряжениях от  $E/10^3$  до  $E/10^2$ . Особенно это характерно для больших длин оптических волокон. Большое влияние на прочность оказывает размер микротрещин – C, которые служат источниками разрушения при напряжениях гораздо ниже теоретических. Микротрещине определённой величины  $C_i$  соответствует своя критическая нагрузка  $\delta_i$ , при которой происходит обрыв. Для расчёта критической нагрузки используем формулу:

$$\delta_i = \frac{0,81 \cdot K_{1c}}{\sqrt{C_i}}, \quad (3.16)$$

где  $K_{1c}$  – константа максимальной интенсивности напряжений (для кварцевых ОВ  $K_{1c}=0,789 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ).

Рассчитаем для микротрещин 0,1 мкм:

$$\delta_i = \frac{0,81 \cdot 0,789 \cdot 10^6}{\sqrt{0,1 \cdot 10^{-6}_i}} = 2,021 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Для микротрещин 1 мкм:

$$\delta_i = \frac{0,81 \cdot 0,789 \cdot 10^6}{\sqrt{1 \cdot 10^{-6}_i}} = 6,391 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

Для микротрещин 5 мкм:

$$\delta_i = \frac{0,81 \cdot 0,789 \cdot 10^6}{\sqrt{5 \cdot 10^{-6}_i}} = 2,858 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

Для микротрещин 10 мкм:

$$\delta_i = \frac{0,81 \cdot 0,789 \cdot 10^6}{\sqrt{1 \cdot 10^{-5}_i}} = 2,021 \cdot 10^8 \text{ Па} .$$

Зависимость критической нагрузки  $\delta_1$  от величины микротрещин показана на рисунке 3.7.

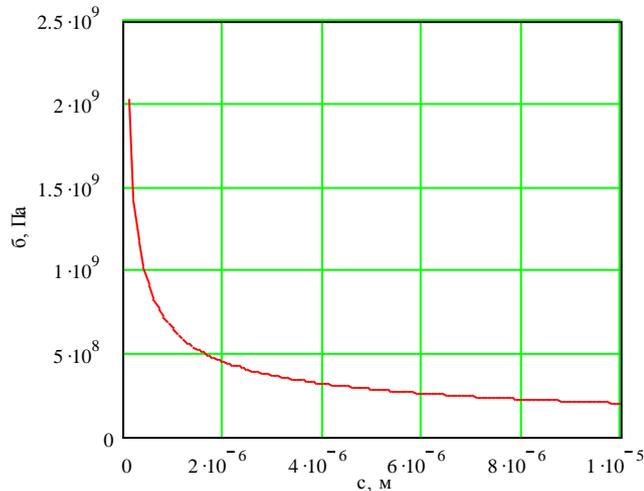


Рисунок 3.7 – Зависимость критической нагрузки от величины микротрещин.

#### Расчёт параметров кумулятивной опасности

Наиболее удобной функцией для определения прочности оптического волокна от прикладываемых нагрузок является функция кумулятивной опасности –  $N(\delta)$ , которая представляет собой зависимость количества обрывов на единицу длины (обычно 1 метр) от величины прикладываемых нагрузок. Кумулятивная опасность обрыва при динамических нагрузках описывается выражением:

$$N(\delta) = (\delta/\theta)^r \cdot 1/m \quad (3.17)$$

Функция кумулятивной опасности  $N(\delta)$  графически представляется в виде прямой в логарифмическом масштабе. Параметр  $r$  определяет степень наклона прямой,  $\theta$  - величину нагрузки, при которой происходит один обрыв на одном метре оптического волокна.

Для экспериментального определения параметров  $r$  и  $\theta$  образцы оптических волокон подвергают разрушению как минимум при двух различных нагрузках  $\delta_1$  и  $\delta_2$  и находят значение  $N(\delta)$  в двух точках. Величина кумулятивной опасности при этом определяется из выражения:

$$N(\delta_i) = n_i/L, 1/m \quad (3.18)$$

где  $n_i$  – количество обрывов в волокне при нагрузке  $\delta_i$ ;

$L$  – длина образца в метрах;

Параметр  $r$  определяется по двум характерным точкам из выражения:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}}, \quad (3.19)$$

где  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$  – величины кумулятивной опасности при нагрузках  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответственно.

Значение параметра  $\theta$  определяется из выражения:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/\kappa}}, \text{ Па} \quad (3.20)$$

Определим параметры кумулятивной опасности  $r$  и  $\theta$ , при числе обрывов –  $n_i$  на оптическом волокне длиной 1 км при различных нагрузках  $\delta_i$ .

Расчёт сделаем для пяти значений  $n_1$  в диапазоне 1÷8 при  $\delta_1=4 \cdot 10^8$  Па и для пяти значений  $n_2$  в диапазоне 10÷50 при  $\delta_2=8 \cdot 10^8$  Па.

Для  $n_1=1$ ;  $n_2=10$ . Определим  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$ :

$$H(\delta_1) = \frac{n_1}{l} = 10^{-3}, \quad 1/\text{м}$$

$$H(\delta_2) = \frac{n_2}{l} = 10^{-2}, \quad 1/\text{м}$$

Определим параметр  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = 3,32. \quad (3.21)$$

Определим параметр  $\theta$  по формуле:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/r}} = 3,2 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Для  $n_1=2$ ;  $n_2=20$ . Определим  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$ :

$$H(\delta_1) = \frac{n_1}{l} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}$$

$$H(\delta_2) = \frac{n_2}{l} = 0,02 \text{ 1/м}$$

Определим параметр  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = 3,322.$$

Определим параметр  $\theta$  по формуле:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/r}} = 2.597 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Для  $n_1=4$ ;  $n_2=30$ . Определим  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$ :

$$H(\delta_1) = \frac{n_1}{l} = 4 \cdot 10^{-3}, \text{ 1/м}$$

$$H(\delta_2) = \frac{n_2}{l} = 0,03 \text{ 1/м}$$

Определим параметр  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = 2.907.$$

Определим параметр  $\theta$  по формуле:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/r}} = 2.673 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Для  $n_1=6$ ;  $n_2=40$ . Определим  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$ :

$$H(\delta_1) = \frac{n_1}{l} = 6 \cdot 10^{-3}, \text{ 1/м}$$

$$H(\delta_2) = \frac{n_2}{l} = 0,04 \cdot 1/\text{м}$$

Определим параметр  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = 2.737.$$

Определим параметр  $\theta$  по формуле:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/r}} = 2.593 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Для  $n_1=8$ ;  $n_2=50$ . Определим  $H(\delta_1)$  и  $H(\delta_2)$ :

$$H(\delta_1) = \frac{n_1}{l} = 8 \cdot 10^{-3}, \quad 1/\text{м}$$

$$H(\delta_2) = \frac{n_2}{l} = 0,05 \cdot 1/\text{м}$$

Определим параметр  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\ln \frac{H(\delta_2)}{H(\delta_1)}}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = 2.644.$$

Определим параметр  $\theta$  по формуле:

$$\theta = \frac{\delta_1}{H_1^{1/r}} = 2.484 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

### **3.7 Расчет кумулятивной опасности обрыва от статических нагрузок и расчет надежности оптического волокна при его старении**

Кумулятивная опасность обрыва от статических нагрузок характеризует изменение прочности оптического волокна во времени при постоянной нагрузке. Снижение механической прочности происходит за счёт наличия механических нагрузок и за счёт присутствия влаги в окружающей среде.

В этом случае происходит медленный рост микротрещин до критических размеров. Величина кумулятивной опасности обрыва  $H(\delta_a, t)$  от статических нагрузок -  $\delta_a$  определяется по формуле:

$$H(\delta_a, t) = \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}}, \quad (3.22)$$

где  $n$  – коэффициент коррозии;

$t_0$  – время до первого обрыва при нагрузке  $\theta$ ;

Кумулятивная опасность обрыва является одним из параметров надёжности оптического волокна. Надёжность оптического волокна при его старении (с точки зрения механической прочности) зависит от его длины –  $L$  и определяется при статической нагрузке из выражения:

$$P(\delta_a, t, L) = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} \right]. \quad (3.23)$$

При динамической нагрузке  $\delta_k$  надёжность определяется как вероятность целостности оптического волокна длиной  $L$ :

$$P(\delta_k) = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_k}{\theta} \right)^r \right]. \quad (3.24)$$

Исходя из этих выражений можно определить снижение надёжности оптического волокна от его старения.

Определим величину кумулятивной опасности  $H(\delta, t)$  через время  $t$  при  $n=20$ ,  $r=3$ ,  $t_0=0,1$  с;  $\theta=10$  ГПа,  $\delta_a=2 \cdot 10^8$  Па. Проведем расчёт для пяти значений  $t$  в диапазоне 5÷20 лет.

Для  $t=5$  лет ( $t=1,577 \cdot 10^8$  с)

$$H(\delta_a, t) = \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} = 7,409 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м.}$$

Для  $t=10$  лет ( $t=3,154 \cdot 10^8$  с):

$$H(\delta_a, t) = \left(\frac{\delta_a}{\theta}\right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left(\frac{\theta}{\delta_a}\right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} = 8,316 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м.}$$

Для t=15 лет ( $t=4,73 \cdot 10^8$  с):

$$H(\delta_a, t) = \left(\frac{\delta_a}{\theta}\right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left(\frac{\theta}{\delta_a}\right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} = 8,897 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м.}$$

Для t=20 лет ( $t=6,307 \cdot 10^8$  с):

$$H(\delta_a, t) = \left(\frac{\delta_a}{\theta}\right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left(\frac{\theta}{\delta_a}\right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} = 9,334 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м.}$$

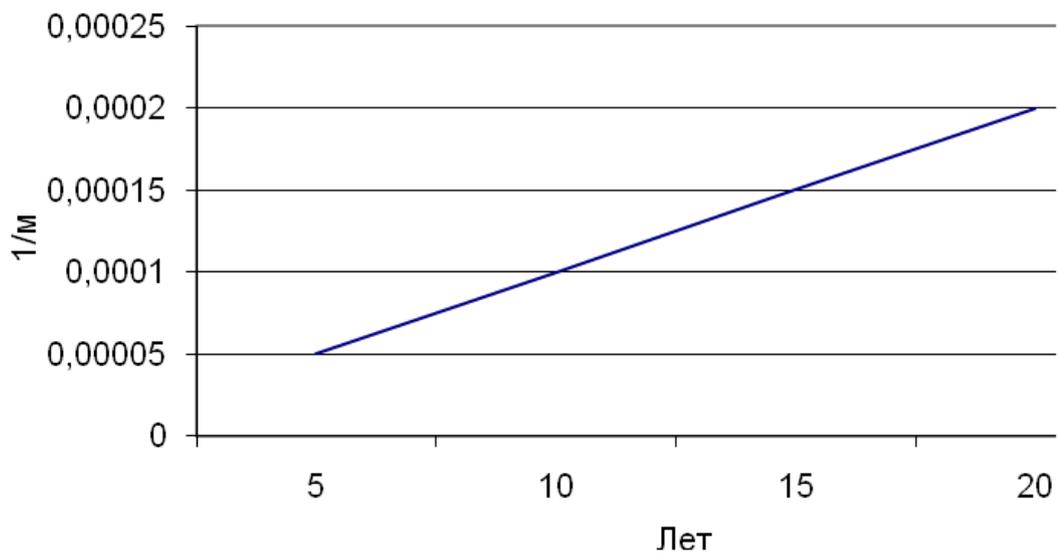


Рисунок 3.8 – Зависимость величины кумулятивной опасности от времени

Определим величину снижения надёжности оптического волокна через время эксплуатации  $t$ . Расчёт проделать для пяти значений  $t$  в диапазоне 5÷20 лет при  $\delta_a=2 \cdot 10^8$  Па;  $n=20$ ;  $r=3$ ;  $t_0=0,1$  с;  $\theta = 10$  ГПа;  $L=1$  км.

Для  $t=5$  лет ( $t=1,577 \cdot 10^8$  с) найдём значение  $P_1$  по формуле:

$$P_1 = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^r \right] = 0,992,$$

$$P_2 = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} \right] = 0,929.$$

Определим величину снижения надёжности:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0,992 - 0,929 = 0,063.$$

Для  $t=10$  лет ( $t=3,154 \cdot 10^8$  с) найдём значение  $P_1$  по формуле:

$$P_2 = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} \right] = 0,92.$$

Определим величину снижения надёжности:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0,992 - 0,92 = 0,072.$$

Для  $t=15$  лет ( $t=4,73 \cdot 10^8$  с) найдём значение  $P_1$  по формуле:

$$P_2 = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} \right] = 0,915.$$

Определим величину снижения надёжности:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0,992 - 0,915 = 0,077.$$

Для  $t=20$  лет ( $t=6,307 \cdot 10^8$  с) найдём значение  $P_1$  по формуле:

$$P_2 = \exp \left[ -L \left( \frac{\delta_a}{\theta} \right)^{\frac{r \cdot n}{n-2}} \left\{ \frac{t + t_0 \left( \frac{\theta}{\delta_a} \right)^2}{t_0} \right\}^{\frac{r}{n-2}} \right] = 0,911.$$

Определим величину снижения надёжности:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 0,992 - 0,911 = 0,081.$$

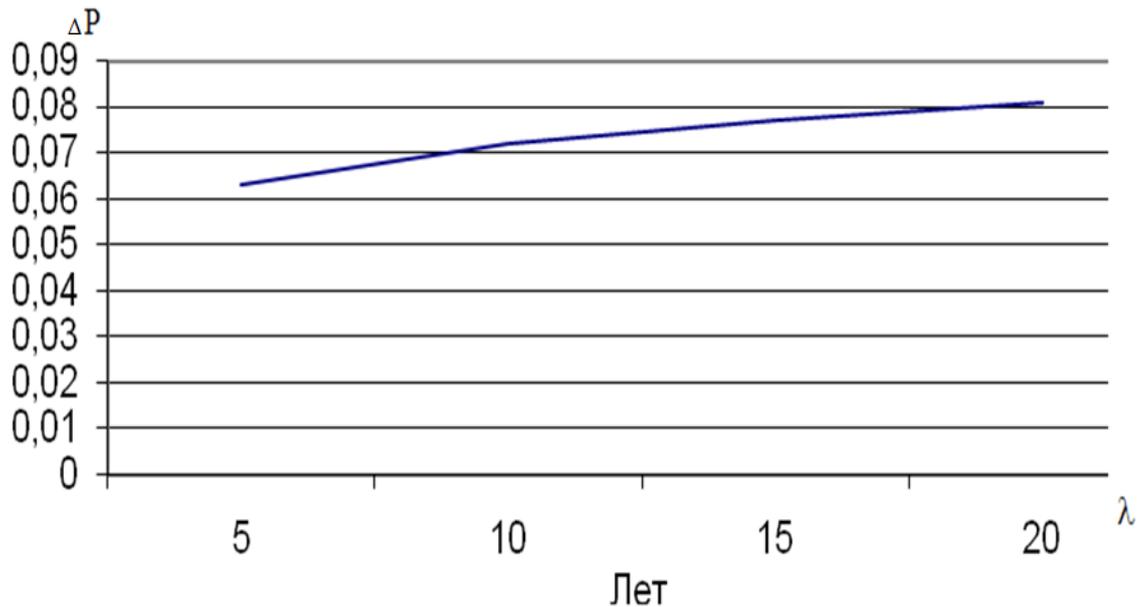


Рисунок 3.9 – Зависимость вероятности возникновения старения работы оптоволоконного кабеля от времени

### 3.8 Расчет надёжности оптического кабеля

Под надёжностью устройства, в том числе и оптического кабеля, понимают его свойство выполнять заданные функции в определённых условиях в течение определённого промежутка времени.

Особенности оптического кабеля определяют специфический подход к определению их вероятностно-временных параметров и надёжности. Значительная часть отказов в оптических кабелях, изготовленных из оптических волокон с недостаточно высокой механической прочностью, может происходить из-за обрывов оптических волокон. Обрыв волокна не влечёт за собой ухудшение в передаче информации по другим волокнам, а приводит к нарушению работы только одной из систем передачи, работающей на данном кабеле. Поэтому в оптических кабелях часто целесообразно рассматривать надёжность работы пары оптических волокон, а не всего кабеля. Надёжность работы (при рассмотрении процесса старения

оптического волокна) одной любой пары оптического волокна в оптическом кабеле без использования резервных волокон определяется по формуле:

$$P_{nno} = p^{2n} + p^2 \sum_{i=1}^{2(n-1)} (2(n-1)_i)(1-p)^i p^{2(n-1)-i} + 2p(1-p) \sum_{j=1}^{2(n-1)} (2(n-1)_j)(1-p)^j p^{2(n-1)-j} \quad (3.25)$$

где  $n$  – число пар оптических волокон в оптическом кабеле связи;  
 $p$  – вероятность безотказной работы одного оптического волокна;  
 $(2(n-1)_i)$  и  $(2(n-1)_j)$  – биномиальные коэффициенты;  
 $j$  – принимает нечётные значения.

Одним из способов повышения надёжности работы пары оптических волокон является резервирование оптических волокон в конструкции оптических кабелей связи. При этом необходимо учитывать, что резервирование наиболее эффективно при необходимости создания высоконадёжного оптического кабеля. Надёжность работы одной любой пары оптических волокон в оптическом кабеле с резервными волокнами определяется из выражения:

$$P_{nno} = \sum_{i=2n}^{2n+b} (2n+b_i)p^i(1-p)^{2n+b-i} + p^2 \sum_{j=b+1}^{2(n-1)+b} (2(n-1)+b_j)(1-p)^j p^{2(n-1)+b-j} + \\ + 2p(1-p) \sum_{\alpha=b+1}^{2(n-1)+b} (2(n-1)+b_\alpha)(1-p)^\alpha p^{2(n-1)+b-\alpha} \quad (3.26)$$

где  $b$  – число резервных волокон в оптическом кабеле связи;  
 $\alpha$ - принимает нечётные значения при чётных значениях  $b$  и чётные значения при нечётных значениях  $b$ .

Надёжность работы оптического кабеля связи при старении оптических волокон (снижении механической прочности от влаги и механической нагрузки) определяется из выражения:

$$P_{окс} = p^{2n}, \quad (3.27)$$

а при наличии резервных волокон – из выражения:

$$P_{окс} = \sum_{i=2n}^{2n+b} (2n+b_i)p^i(1-p)^{2n+b-i}. \quad (3.28)$$

Определим надёжность работы пары оптических волокон и оптического кабеля связи без резервирования и с резервными волокнами. Расчёт проделаем для двухволоконного оптического кабеля связи одним резервным волокном и без резервного волокна при пяти значениях надёжности оптических волокон  $P=0,99; 0,95; 0,9; 0,85; 0,8$ .

Найдём надёжность оптического без резервных волокон для  $P=0,8$  по формуле:

$$P_{\text{окс}} = p^{2n} = 0,8^2 = 0,64.$$

Надёжность двухволоконного оптического кабеля связи с одним резервным волокном определим по формуле:

$$P_{\text{окс}} = \sum_{i=2n}^{2n+b} (2n + b_i) p^i (1 - p)^{2n+b-i} = \sum_{i=2-1}^{2-1+1} (2 \cdot 1 + 1_i) 0,8^2 (1 - 0,8)^{2-1+1-2} = 0,788.$$

Надёжность работы одной любой пары ОВ в двухволоконном оптическом кабеле без резервных волокон определим из выражения:

$$P_{\text{нпо}} = p^{2n} + p^2 \sum_{i=1}^{2(n-1)} (2(n-1)_i) (1 - p)^i p^{2(n-1)-i} + 2p(1 - p) \sum_{j=1}^{2(n-1)} (2(n-1)_j) (1 - p)^j p^{2(n-1)-j} = 0,802$$

Надёжность работы одной любой пары ОВ в двухволоконном оптическом кабеле с одним резервным волокном найдём из выражения:

$$\begin{aligned} P_{\text{нпо}} = & \sum_{i=2n}^{2n+b} (2n + b_i) p^i (1 - p)^{2n+b-i} + p^2 \sum_{j=b+1}^{2(n-1)+b} (2(n-1) + b_j) (1 - p)^j p^{2(n-1)+b-j} + \\ & + 2p(1 - p) \sum_{\alpha=b+1}^{2(n-1)+b} (2(n-1) + b_\alpha) (1 - p)^\alpha p^{2(n-1)+b-\alpha} = 0,831 \end{aligned}$$

### 3.9 Расчет взаимных влияний в оптическом кабеле

Световоды, находящиеся в общем сердечнике оптического кабеля могут оказывать воздействие на соседние волокна в результате взаимного перехода энергии с одного волокна на другое. Взаимные помехи между оптическими волокнами обусловлены следующими факторами:

просачиванием энергии через оболочку волокна. Поле распространяющейся волны спадает в поперечной плоскости по экспоненциальному закону и при тонкой оболочке может просачиваться в окружающее пространство и возбуждать помехи в расположенных рядом волокнах;

наличием микроизгибов и макроизгибов в волокне. Микро- и макроизгибы приводят к излучению части энергии направляемой волны в окружающее пространство и к её переходу в волокна. Распределение поля в двух соседних волокнах показано на рис. 3.10.

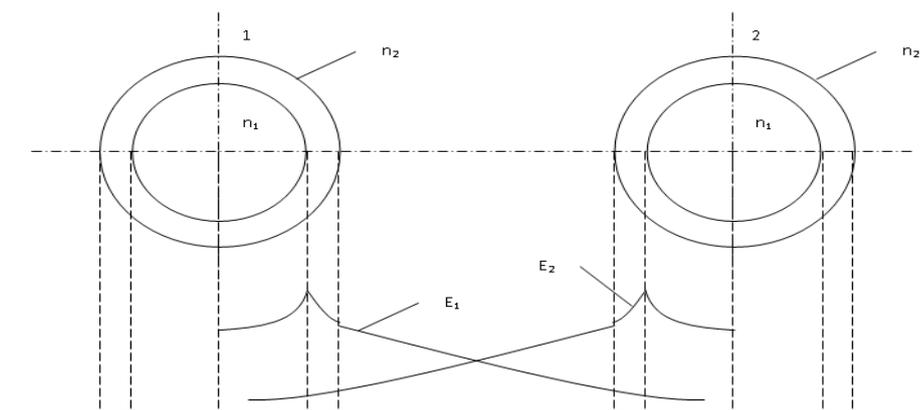


Рисунок 3.10 – Взаимные влияния в оптическом кабеле

Часть поля одного волокна проникает в соседнее волокно и проявляется там в виде помехи.

Уровень взаимных влияний в оптических кабелях зависит от конструкции кабельного сердечника, т.е. взаимного расположения волокон. Наибольшие взаимные влияния будут наблюдаться в конструкциях с повивным сердечником. В конструкциях ленточного типа и в конструкциях с прямоугольным сердечником взаимные влияния между волокнами будут иметь меньшую величину.

Степень влияния между оптическими волокнами можно оценить, рассчитав вторичные параметры влияния от двух соседних волокон. Переходное затухание на ближнем конце:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4\alpha}{N^2 m (1 - e^{-2\alpha L})} \right|, \text{ дБ} \quad (3.29)$$

Защищённость от помех:

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2}{N^2 m L} \right|, \text{ дБ} \quad (3.30)$$

Переходное затухание на дальнем конце:

$$A_1 = A_3 + \alpha L, \text{ дБ} \quad (3.31)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания оптоволокна, дБ/км;  
 $L$  – длина усилительного участка оптического кабеля, км;  
 $m$  – коэффициент связи между оптическими волокнами, который зависит от расстояния между волокнами (при непосредственном касании

волокон по всей длине кабеля  $m=1$ , при удалении волокон на расстояние порядка их радиуса  $m=0,6 \div 0,7$ );

$N$  – коэффициент проникновения поля через оболочку волокна:

$$N = \frac{q_{1,2} \cdot q_{2,3} \cdot e^{-kt}}{1 - p_{1,2} \cdot p_{2,3} \cdot e^{-2kt}}, \quad (3.32)$$

где  $k = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$  - коэффициент потерь в оболочке; (3.33)

$t$  – толщина оболочки;

$q_{1,2}$ ,  $q_{2,3}$  – коэффициенты преломления на границе сердечника ( $n_1$ ), оболочки ( $n_2$ ) и воздуха ( $n_3$ );

$$q_{1,2} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}, \quad (3.34)$$

$$q_{2,3} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3}. \quad (3.35)$$

$N$  – характеризует долю просачивания энергии через оболочку волокна и, если он меньше  $10^{-5} \div 10^{-6}$ , то для используемых на практике оптических волокон и величин  $L$   $A_0 > 120$  дБ;  $A_3 > 90$  дБ;  $A_e > 100 \div 120$  дБ их взаимными влияниями можно пренебречь.

С ростом толщины оболочки  $t$  и частоты оптических колебаний взаимные влияния резко уменьшаются. Переходные помехи также тем меньше, чем больше отличаются  $n_1$  и  $n_2$ , так как при этом сильнее эффект отражения поля на границе сердечника. Для снижения помех целесообразно в оптических волокнах применять поглощающее (защитное) покрытие из полимерных материалов, которое наносится непосредственно при изготовлении волокон.

Рассчитаем параметры влияния на частоте  $f=10^{14}$  Гц между многомодовыми двухслойными оптическими волокнами с параметрами  $n_1=1,48$ ;  $n_2=1,44$ ;  $t=2$  мкм. Коэффициент затухания волокон -  $\alpha=0,9$  дБ/км. Коэффициент преломления окружающей среды -  $n_3=1$ . Волокна соприкасаются по всей длине кабеля, длина усилительного участка –  $L=6$  км.  $m=0,6$ .

Вычислим  $q_{1,2}$ :

$$q_{1,2} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} = 1,014.$$

Вычислим  $q_{2,3}$ :

$$q_{2,3} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3} = 1,18,$$

$$p_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = 0,014,$$

$$p_{2,3} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} = 0,18.$$

Определим k:

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu} = 3,1 \cdot 10^6,$$

где  $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ ;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7};$$

$$\varepsilon = n^2;$$

$$\mu = 1;$$

Находим N:

$$N = \frac{q_{1,2} \cdot q_{2,3} \cdot e^{-kt}}{1 - p_{1,2} \cdot p_{2,3} \cdot e^{-2kt}} = 2,43 \cdot 10^{-3}.$$

Переходное затухание на ближнем конце:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4\alpha}{N^2 m (1 - e^{-2\alpha L})} \right| = 120,142 \text{ дБ.}$$

Помехозащищённость:

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2}{N^2 m L} \right| = 99,473 \text{ дБ.}$$

Переходное затухание на дальнем конце:

$$A_1 = A_3 + \alpha L = 125,542 \text{ дБ.}$$

Построим график зависимости переходного влияния на ближнем конце от расстояния:

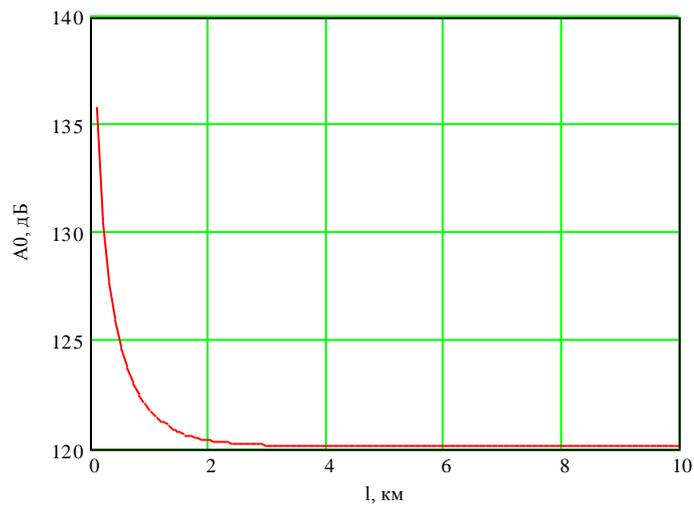


Рисунок 3.11 – Зависимость переходного затухания на ближнем конце от расстояния

Зависимость помехозащищённости от расстояния показана на рисунке 3.12:

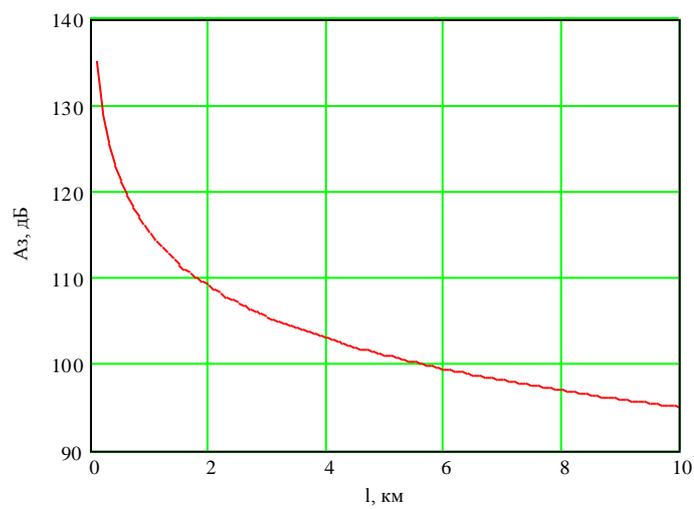


Рисунок 3.12 – Зависимость помехозащищённости от расстояния

## Заклучение

Современный этап общественного развития осуществляется по пути построения глобального информационного общества, что обеспечивается за счет развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций.

В данной работе дан анализ краткой истории динамики развития абонентов широкополосного доступа и современного состояния абонентских линий связи. Представлен анализ принципов построения и работы сети на основе PON.

В работе был представлен анализ параметров качества абонентских линий на базе ВОЛС. Для более качественной передачи информации необходимо было выбрать оптимальные параметры сети. С помощью рефлектометра был произведен эксперимент для трех длин волн ( $\lambda = 850, 1310$  и  $1550$  нм), измерения проводились в поврежденной ветви сети: от последнего разветвителя до ONU на расстоянии около 35 км от начала линии.

На рисунке 2.4 представлена зависимость затухания от длины волны при разных расстояниях (при  $L=10, L=18, L=28$ ), и отмечено, что при увеличении расстояния затухание для одномодового волокна ( $\lambda=1550$  нм) изменяется незначительно, а для многомодового волокна затухание растет с увеличением расстояния. Рефлектометрические измерения позволяют определить точное положение неоднородностей. Определена величина снижения надёжности оптического волокна через время эксплуатации  $t$ , расчёт проделан для пяти значений  $t$  в диапазоне  $5 \div 20$ . Из рисунка 3.9 видно, что вероятность возникновения старения работы оптоволокна со временем растет, приблизительно на 8-9 процентов. Факторы из-за которого происходит старение являются: в процессе эксплуатации кабель, проложенный в земле, подвергается воздействию положительных и отрицательных температур, воздействию влаги, слабых растворов щелочей и кислот, содержащихся в грунте, что может привести к необратимым изменениям механических и электрических параметров кабеля, то есть к его старению. Прежде всего страдают от этого воздействия защитные покрытия кабеля.

## Перечень сокращений

- АТМ – асинхронный метод передачи  
ВОЛС – волоконно-оптические линии связи  
ИМ – имитационное моделирование  
ОСД – оптическая сеть доступа  
ПК – персональный компьютер  
РК – республика Казахстан  
СМО – система массового обслуживания  
СПД – сеть передачи данных  
ССШП – строго самоподобный в широком смысле процесс  
ССОП – сети связи следующего поколения  
ШПД – широкополосный доступ  
CoS (Class of Service) – класс обслуживания  
EPON – пассивные оптические сети на основе технологии Ethernet  
FTTB (Fiber To The Building) — волокно до здания  
FTTC (Fiber To The Curb) — волокно до микрорайона, квартала или группы домов  
FTTH (Fiber to the Home) – оптоволокну до дома  
FTTN (Fiber To The Node) — волокно до сетевого узла;  
GPON (Gigabit Passive Optical Network) – гигабитная пассивная оптическая сеть  
NGA (Next-generation access) – доступ следующего поколения  
OCDM (Optical Code Division Multiplexing) – оптическое кодовое мультиплексирование  
ONT (Optical Network Terminal) – окончание оптической сети  
OSI – эталонная семи уровневая модель  
IP (Internet Protocol) – межсетевой протокол  
IPTV – цифровое интерактивное телевидение нового поколения  
P2P (point to point) – точка-точка  
P2MP (point to multipoint) – точка-многоточка  
PON (Passive Optical Networks) – пассивные оптические сети  
QoS (Quality of Service) – качество обслуживания  
TCP (Transmission Control Protocol) – протокол управления передачей  
TCP/IP – стек протоколов TCP/IP  
TDM (Time Division Multiplexing) – временное разделение каналов  
ToS (Type of Service) – тип сервиса

SOA (Semiconductor Optical Amplifier) – полупроводниковые оптические усилители

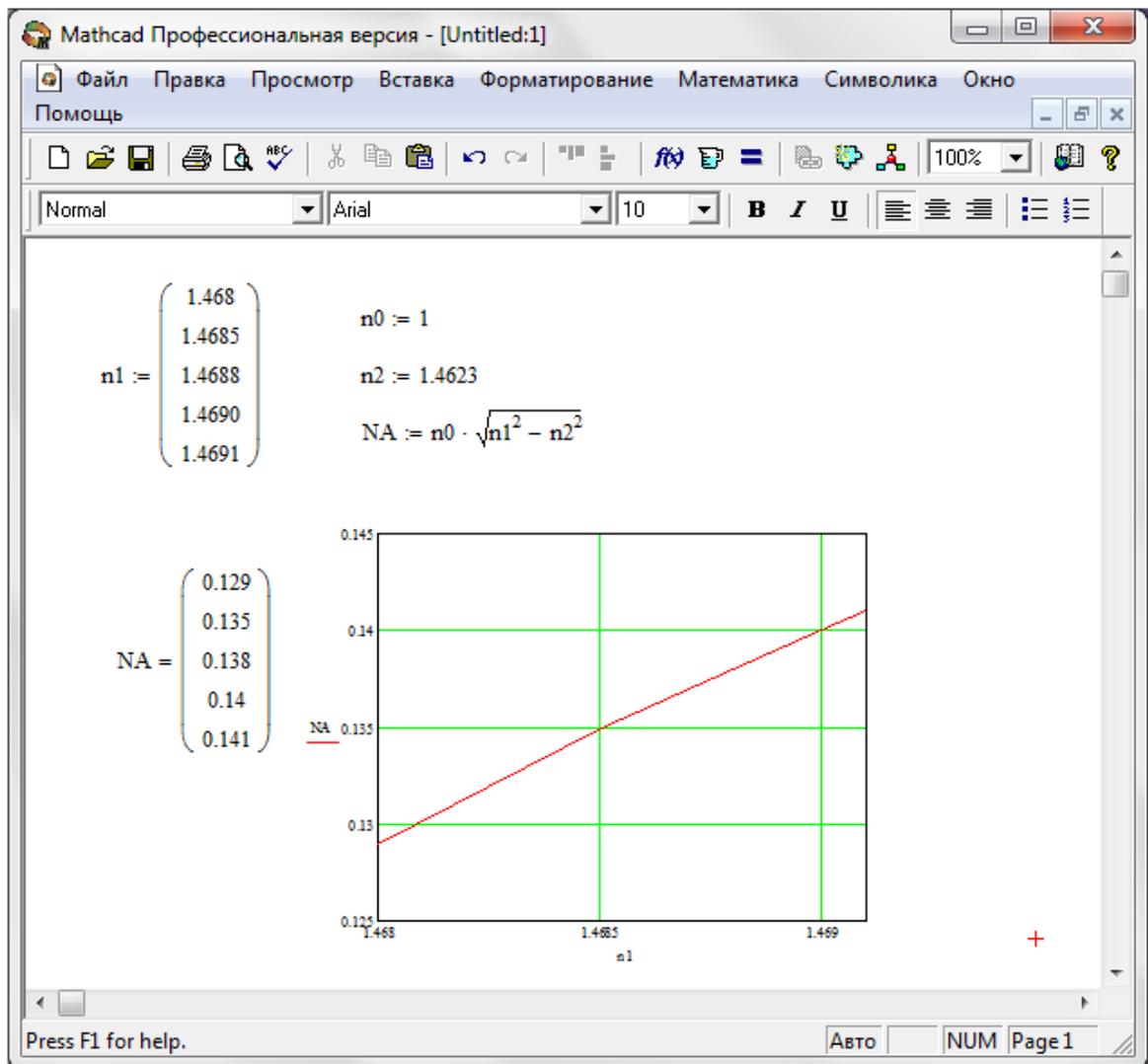
WDM (Wavelength Division Multiplexing) – мультиплексирование по длине волны

## Список литературы

- 1 Государственная программа «Информационный Казахстан – 2020». <http://egov.kz>.
- 2 Салихов Р. Инвестиционные возможности, Казахстан. <http://www.json.ru>.
- 3 Lee, С.-Н, Sorin.W.V, Kim.B.Y, “Fiber to the Home Using a PON Infrastructure”, IEEE J. Lightwave Technol., Issue.12, Vol. 24 , pp 4568-4583, Dec 2006.
- 4 Салтыков А.Р. Будущее оптических сетей доступа. <http://www.google.kz>.
- 5 GlenKramer, “Ethernet Passive Optical Networks”,New York: McGraw-Hill, 2005.
- 6 Свинцов А.Г, Оптимизация параметров оптического рефлектометра для обнаружения неоднородности при попытке несанкционированного доступа в ВОЛС // «Фотон-Экспресс» Наука. - 2006. - №6. С. 56-71.
- 7 Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005 – 208 с.
- 8 “Coexistence with Current Systems-10GE-PON System Configuration”, IEEE802.3.Plenary Meeting, Orlando, FL, March 12-16, 2007.
- 9 Архитектура оптических сетей доступа FTTH (Fiber-to-the-Home). [Официальный документ Cisco](#).
- 10 Скляров О.К. “Современные волоконно-оптические системы передачи”. - М.: Солон-Р, 2001. - 296 с
- 11 Rajesh K. What is FTTH – Fiber To The Home & Advantages of P2P vs P2M/PON Architectures. <http://www.excitingip.com>.
- 12 Барабаш П., Воробьев С., Махровский О. Проводные технологии сетей абонентского доступа: принципы построения, классификация // Каталог «Технологии и средства связи». 2008. – URL: [www.tssonline.ru](http://www.tssonline.ru).
- 13 Гасымов И. Архитектура оптических сетей доступа FTTH (Fiber-to-the-Home) // Официальный документ компании Cisco System Inc. 2007. – 12 с.
- 14 Пассивные оптические сети PON. Абонентский участок FTTH // Компания ДЕПС [Эл. ресурс] - URL: [www.etkis.ru](http://www.etkis.ru).
- 15 Технология FTТх // Prointex telecommunication equipment [Эл. ресурс]. - URL: [www.prointech.ru](http://www.prointech.ru).
- 16 Алексеев Е.Б. Оптические сети доступа. Учебное пособие - М: ИПК при МТУ СИ, 2005 г. - 140 с.
- 17 Нейман, В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика / В.И. Нейман // Тр. МАС. – 1999. – № 1 (9). – С. 1–15.

# Приложение А

## Числовая апертура



## Приложение Б

Листинг программы расчета качества обслуживания

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ComCtrls, TabNotBk, Grids, ExtCtrls, TeEngine,
  TeeFunci, Series, TeeProcs, Chart;
const n=2;
type
matrix=array[1..n,1..n] of real;
  vector=array[1..n] of real;
  TForm1 = class(TForm)
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  end;
var
  Form1: TForm1;
  A,Obr_A,Exp_M:matrix;
  B, X_an, X_ch, X, Xc, lambda, C_int, mu, K, G, v: vector;
  i,j,k: integer;
  complex: boolean;
  tau1,tau2,Tnn,Fc,h,t,m,s1,s2: real;
  grdr,grmd:integer;
implementation
{$R *.dfm}
Procedure Mult_Matr_Vect(n:integer; A:matrix; X:vector; Var Y: vector);
var i,j:integer;
begin
  for i:=1 to n do
    begin
      y[i]:=0;
      for j:=1 to n do
        y[i]:=y[i]+a[i,j]*x[j];
      end;
    end;
end;
Procedure Mult_Vect_Const(n:integer; Var B:vector; C:real);
var i:integer;
begin
  for i:=1 to n do
    b[i]:=c*b[i];
  end;
end;
Procedure Det_Xc(n:integer; A:matrix; B:vector; var Xc:vector);
```

```

var Obr_A:matrix;
begin
Obr_matr(A,Obr_A);
Mult_Matr_Vect(n,Obr_A,B,Xc);
Mult_Vect_Const(n,Xc,-E);
end;
Procedure Mult_Matr(n:integer; A1,A2:matrix; var A_rez:matrix);
var i,j,k:integer;
begin
for i:=1 to n do
for j:=1 to n do
begin
a_rez[i,j]:=0;
for k:=1 to n do
a_rez[i,j]:=a_rez[i,j]+a1[i,k]*a2[k,j];
end;
end;
end;
Procedure Mult_Matr_Const(n:integer; Var A:matrix; c:real);
var i,j:integer;
begin
for i:=1 to n do
for j:=1 to n do
a[i,j]:=c*a[i,j];
end;
end;
Procedure Sum_Matr(n:integer; A1,A2:matrix; var A_sum:matrix);
var i,j:integer;
begin
for i:=1 to n do
for j:=1 to n do
a_sum[i,j]:=a1[i,j]+a2[i,j];
end;
end;
Procedure Sum_Vect(n:integer; B1,B2:vector; var B_sum:vector);
var i:integer;
begin
for i:=1 to n do
b_sum[i]:=b1[i]+b2[i];
end;
end;
Procedure Det_lambda(A:matrix; var lambda:vector; var complex:boolean);
var p0,p1,D:real;
begin
p1:=-a[1,1]+a[2,2];
p0:=a[1,1]*a[2,2]-a[1,2]*a[2,1];
D:=sqr(p1)-4*p0;
if D>=0 then

```

```

begin
complex:=false;
lambda[1]:=(-p1+sqrt(D))/2;
lambda[2]:=(-p1-sqrt(D))/2;
end
else
begin
complex:=true;
lambda[1]:=-p1/2;
lambda[2]:=sqrt(-D)/2;
end;
end;
Procedure Exp_matr(n:integer; A:matrix; t:real; complex:boolean;
lambda:vector;
var Exp_M:matrix);
var Z1,Z2:matrix;
begin
if not complex then
begin
Form_E1(n,Z1);
Mult_Matr_Const(n,Z1,-lambda[2]);
Sum_Matr(n,A,Z1,Z1);
Mult_Matr_Const(n,Z1,exp(lambda[1]*t)/(lambda[1]-lambda[2]));
Form_E1(n,Z2);
Mult_Matr_Const(n,Z2,-lambda[1]);
Sum_Matr(n,A,Z2,Z2);
Mult_Matr_Const(n,Z2,exp(lambda[2]*t)/(lambda[2]-lambda[1]));
Sum_Matr(n,Z1,Z2,Exp_M);
end
else
begin
Form_E1(n,Z1);
Mult_Matr_Const(n,Z1,exp(lambda[1]*t)*cos(lambda[2]*t));
Form_E1(n,Z2);
Mult_Matr_Const(n,Z2,-lambda[1]);
Sum_Matr(n,A,Z2,Z2);
Mult_Matr_Const(n,Z2,exp(lambda[1]*t)*sin(lambda[2]*t)/lambda[2]);
Sum_Matr(n,Z1,Z2,Exp_M);
end;
end;
Procedure Csum(n:integer; a:matrix; B:vector; h:real;
var X:vector);
var K1,K2,K3,K4,Y,Y1,Y2,Y3:vector;
begin

```

```

Mult_Vect_Const(n,B,160);
Mult_Matr_Vect(n,A,X,K1);
Sum_Vect(n,K1,B,K1);
Mult_Vect_Const(n,K1,h);
Mult_Vect_Const(n,K1,1/2);
Sum_Vect(n,K1,X,Y1);
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
Form_K_L;
with StringGrid1 do
begin
cells[0,1]:=' A=';
for i:=1 to n do
begin
for j:=1 to n do
Cells[i,j]:=FloatToStrF(a[i,j],ffixed,9,4);
end;
end;
with StringGrid2 do
begin
cells[0,1]:=' B=' ;
for i:=1 to n do
Cells[1,i]:=FloatToStrF(b[i],ffixed,7,4);
end;
Det_Xc(n,A,B,Xc);
With StringGrid3 do
begin
cells[0,1]:=' Xc=' ;
for i:=1 to n do
cells[1,i]:=FloatToStrF(Xc[i],ffixed,7,4);
end;
Det_Lambda(A,lambda,complex);
if not complex then
begin
for i:=1 to n do
memo1.Lines.Add(FloatToStrF(lambda[i],ffgeneral,9,4));
tau[1]:=1/abs(lambda[1]);
tau[2]:=1/abs(lambda[2]);
if tau[1]>tau[2] then
Tnn:=5*tau[1]
else
Tnn:=5*tau[2];
Edit8.Text:=FloatToStrF(tau[1],ffgeneral,7,4);
Edit9.Text:=FloatToStrF(tau[2],ffgeneral,7,4);

```

```

Edit10.Text:=FloatToStrF(Tnn,ffgeneral,7,4);
end
else
begin
edit8.Text:=(FloatToStrF(lambda[1],ffgeneral,9,4)+'+j'+FloatToStrF(lambda[
2],ffgeneral,9,4));
edit9.text:=(FloatToStrF(lambda[1],ffgeneral,9,4)+'-
j'+FloatToStrF(lambda[2],ffgeneral,9,4));
tau[1]:=1/abs(lambda[1]);
Tnn:=5*tau[1];
Fc:=lambda[2]/(2*pi);
edit10.Text:=(FloatToStrF(tau[1],ffgeneral,9,4));
{ edit11.text:=(FloatToStrF(Tnn,ffgeneral,9,4));
edit12.Text:=(FloatToStrF(Fc,ffgeneral,9,4)); }
end;
t:=0.0001;
h:=0.0001;
i:=1;
x_an[1]:=0;
x_an[2]:=0;
x_ch[1]:=0;
x_ch[2]:=0;
C_int:=Xc;
Mult_Vect_Const(n,C_int,-1);
i:=1;
Exp_matr(n,A,t,complex,lambda,exp_M);
Mult_Matr_vect(n,exp_M,C_int,x_an);
Sum_vect(n,Xc,x_an,x_an);
s1:=s1+(x_an[1]-(x_ch[1]+0.7*(x_an[1]-x_ch[1])))/x_an[1];
s2:=s2+(x_an[2]-(x_ch[2]+0.7*(x_an[2]-x_ch[2])))/x_an[2];
until (t>=Tnn);
memo8.Lines.Add(FloatToStrF(s1*100/(Tnn/h),ffixed,4,2));
memo9.Lines.Add(FloatToStrF(s2*100/(40),ffixed,4,2));
end;
end.

```