

Федеральное агентство связи

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

В.Г. Фокин

Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети

*Учебное пособие
издание 2-е, исправленное и дополненное*



Новосибирск
2019

УДК 621.391.6: 681.324

Фокин В.Г. Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети. Учебное пособие. Новосибирск: СибГУТИ, 2019, - 241 с.

Учебное пособие предназначено для студентов направления подготовки 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации «Магистр» и «Бакалавр» по профилям «Многоканальные телекоммуникационные системы» и «Оптические системы и сети связи». Также предназначено для специалистов предприятий связи, повышающих свою квалификацию по актуальному направлению развития техники оптической связи.

Рассматриваются виды и источники информационной нагрузки, модели и технологии оптических транспортных сетей, сетевые элементы и архитектуры оптических сетей, защита соединений, синхронизация и управление в оптических транспортных сетях, электрические и оптические интерфейсы агрегатной и клиентских сторон, принципы проектирования оптических транспортных сетей с технологиями D/CWDM-OTN/OTH-Ethernet/TP-MPLS/SDH, принципы автоматизации проектирования, порядок выполнения проекта с примерами расчётных и схемных решений.

Ил. - 105, табл. 72, список лит. – 103 назв.

Рецензенты: проф., д.т.н. Пальчун Ю.А., к.т.н. Шиянов В.А.

© Фокин В.Г.

© Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2019 г.

Содержание

Предисловие	6
Введение	8
1 Виды сервисов и источники информационной нагрузки	11
1.1. Виды сервисов	11
1.2 Источники нагрузки и требуемые ресурсы транспортной сети	12
1.3. Технологии сжатия сигналов	16
1.4. Безопасность оптических транспортных сетей	17
Контрольные вопросы	19
2 Модели и технологии оптических транспортных сетей	21
2.1. Транспортная сеть SDH	21
2.2. Транспортная сеть ATM	25
2.3. Транспортная сеть OTN-OTN	28
2.4. Транспортная сеть Ethernet	31
2.5. Отображение моделей и технологий транспортных сетей в оптических мультисервисных транспортных платформах	34
Контрольные вопросы	36
3 Сетевые элементы и структуры оптических транспортных сетей	38
3.1. Принципы построения аппаратуры транспортных сетей	39
3.2. Система обозначений сетевых элементов транспортных сетей	46
3.3. Структуры оптических транспортных сетей	50
Контрольные вопросы	58
4 Защита соединений транспортных сетей	59
4.1. Защита секции мультиплексирования 1+1 (1:1)	62
4.2. Защита секции мультиплексирования в кольцевой сети	65
4.3. Защита соединения тракта	68
4.4. Защитные переключения в сети с многоканальной передачей WDM	72
4.5. Защитные переключения в транспортных сетях ATM и Ethernet	74
Контрольные вопросы	75
5 Синхронизация и управление в оптических транспортных сетях	77
5.1. Проблемы тактовой синхронизации	78
5.2. Определения тактовой сетевой синхронизации	79
5.3. Генераторы сигналов синхронизации	82
5.4. Распределение тактового синхронизма	83

5.5. Порядок разработки схемы сети тактовой синхронизации	88
5.6. Общие принципы управления в оптической мультисервисной транспортной сети	90
5.7. Системы управления оптическими мультисервисными транспортными сетями	93
5.8. Технология T-SDN – перспективное решение управления оптическими сетями	95
5.8.1. Общая характеристика программно-конфигурируемых сетей SDN	95
5.8.2. Программно-конфигурируемые оптические сети T-SDN	97
Контрольные вопросы	100
 6 Электрические и оптические интерфейсы	102
6.1. Электрические интерфейсы	102
6.2. Оптические интерфейсы	105
6.2.1. Одноканальные оптические интерфейсы	105
6.2.2. Многоканальные оптические интерфейсы	116
6.2.3. Различия между характеристиками эквивалентных оптических интерфейсов	125
6.2.4. Оценка характеристик оптических трактов	125
6.2.5. Расчёт характеристик передачи в оптическом канале при каскадировании оптических сетевых элементов	131
6.2. Оптические интерфейсы пассивных оптических сетей	133
Контрольные вопросы	134
 7 Принципы проектирования оптических транспортных сетей	135
 8 Принципы автоматизации проектирования транспортных сетей	138
9 Порядок выполнения курсового проекта и примеры проектных решений	141
9.1. Основные этапы выполнения курсового проекта	141
9.2. Методические указания к отдельным этапам выполнения курсового проекта	144
 Заключение	169
 Приложение 1. Характеристики оптических интерфейсов SDN	171
Приложение 2. Характеристики оптических интерфейсов стандарта G.693	180
Приложение 3. Характеристики оптических интерфейсов G.695	184
Приложение 4. Характеристики одноканальных оптических интерфейсов стандарта G.698.1	192

Приложение 5. Характеристики оптических интерфейсов стандарта G.959.1 для сетей OTN-OTN и SDH	196
Приложение 6. Расчёт характеристик оптических каналов	204
Приложение 7. Примеры основных характеристик мультиплексора ROADM и коммутатора РХС	221
Список сокращений на английском языке	226
Список литературы	236

Предисловие

Вопросам проектирования оптических сетей в учебной литературе уделяется в последнее время всё большее внимание. Вышедшее ранее (в 1997 году) издание автора Н.Н.Слепова содержало ряд полезных указаний по проектированию оптических сетей, но оно было рассчитано только на проектирование транспортной сети синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy). В 2009 году было опубликовано учебное пособие Фокина В.Г. [1] по проектированию оптической мультисервисной транспортной сети, где рассматривается проектирование не только SDH транспортных сетей, но и сетей на основе других транспортных технологий: асинхронного режима передачи - ATM (Asynchronous Transfer Mode), оптической транспортной иерархии - OTN-OTN (Optical Transport Network - Optical Transport Hierarchy) со спектральным мультиплексированием оптических каналов и скоростными режимами до 40 Гбит/с, транспортной технологии на основе Ethernet (EoT, Ethernet-over-Transport) со скоростями передачи до 10 Гбит/с. За прошедшее десятилетие (2009-2019 годы) существенно изменились стандарты и структура оборудования транспортных сетей. Оборудование может поддерживать функции всех транспортных технологий и дополнительно технологии IP (Internet Protocol), MPLS (Multi-Protocol Label Switching) и отдельно транспортного профиля TP-MPLS (Transport Profile), Ethernet PBB/PBT (Provider Backbone Bridge, мост между магистралями провайдеров / Provider Backbone Transport, транспорт трафика опорных операторских сетей), ATM и т.д. То есть оборудование транспортных сетей стало многофункциональным и мультисервисным, оно поддерживает цифровую коммутацию электрических и оптических каналов (называемую λ – коммутацией), маршрутизацию оптических волн и коммутацию пакетов, быструю коммутацию пакетов и все виды защитных переключений. Существенно возросли скорости передачи в оптических каналах до 100 – 400 Гбит/с. Положено начало использованию гибких оптических сеток волн (flex grid) и построению на их основе оптических суперканалов на скорости от 400 Гбит/с до 25 Тбит/с. Для связи между центрами обработки данных (ЦОД) применены новые стандарты передачи пакетов Ethernet на скорости 40, 100 и 400 Гбит/с с перспективой увеличения до 2,4 Тбит/с. Для гибкого управления транспортными сетями разработаны стандарты программно-конфигурируемых транспортных сетей T-SDN (Transport Software Defined Network), которые дополнили возможности управления, заложенные в стандарты автоматически коммутируемых оптических сетей ASON (Automatic Switched Optical Network). Все перечисленные возможности используются или предполагается использовать в сетевых решениях операторов связи России. Созданы и используются новые типы волоконных световодов с несколькими сердцевинами вместо одной (многосердцевинные

волокна на 5, 7, 9, 13 и т.д. сердцевин) и световоды с несколькими независимыми модами (маломодовые волокна на 2, 3, 4 и т.д. мод).

Назрела принципиальная необходимость изменить содержание курсовых и дипломных проектов для студентов направления подготовки 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации «Бакалавр» и «Магистр» по профилям «Транспортные сети и системы связи», «Технологии и системы оптической связи». Предлагаемое учебное пособие призвано усовершенствовать методику проектирования, которая была предложена ранее (более 10 лет назад), и расширить круг решаемых учебных проектных проблем в части оптической интерфейсной базы, режимов одноканальной и многоканальной оптической передачи с когерентным и некогерентным приёмом, пользовательской интерфейсной базы, схем резервирования и защиты, синхронизации и управления, и т.д.

Учебное пособие не имеет аналогов, предназначено для курсового и дипломного проектирования, также может быть рекомендовано для самостоятельного повышения квалификации специалистам предприятий связи.

Введение

Первые два десятилетия 21 века для телекоммуникаций принесли новые, бурные этапы развития интерактивных и распределительных услуг широкого спектра от передачи речи в цифровом формате до десятков и сотен телевизионных программ наивысшего качества в цифровом формате, дистанционное обучение и доступ ко многим базам данных (научных библиотек, административных и медицинских центров и т.д.). Волоконная оптика в доме и офисе стала таким же привычным, необходимым и доступным явлением, как ещё недавно телефон и телевизор.

Для поддержки развития новых услуг электросвязи необходимы разветвлённые, надёжные транспортные сети связи. Такие сети начали создаваться по всему миру в последнее десятилетие 20 века. В основном это сети технологии синхронной цифровой иерархии SDH. Однако эти сети изначально были предназначены для обслуживания трафика, формируемого центрами коммутации каналов, и совершенно не учитывали возможности пакетной передачи информационных сообщений. Кроме того, использование ресурсов волоконно-оптических систем передачи средствами технологии SDH оставляет желать лучшего. Сравните, полоса пропускания одномодового стекловолокна стандарта G.652 (a, b, c, d) составляет около 30 - 60 ТГц в зависимости от разновидности волокна (в пределах скорости до 100 Тбит/с), а скорость передачи самой высокоскоростной системы SDH составляет 40 Гбит/с. Т.е. отличие возможного и действительного составляет три-четыре порядка. Указанные факты и ещё ряд проблем привели к созданию ряда транспортных технологий: ATM; OTN-OTN; EoT; TP-MPLS, о которых сообщается в [2, 3, 4]. Эти технологии в последующем развитии интегрированы в мультисервисные транспортные платформы различной ресурсной ёмкости, которые, в свою очередь, позволяют реализовать как минимум четыре уровня транспортных сетей: большой и сверхбольшой протяженности (Long Haul/ Ultra Long Haul); региональных или внутризоновых (Regional Core); больших городов (Metro-Edge); доступа (Access). Большую роль в развитии транспортных сетей играют стандарты Сектора Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т). Значительная часть материалов учебного пособия построена на основе этих стандартов.

Предлагаемое учебное пособие «Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети» предназначено для углублённого изучения всех известных технологий транспортных сетей в процессе выполнения курсового или дипломного проекта. Для этого в учебное пособие включены 9 глав, 7 приложений и список литературы.

В 1 главе рассматриваются: виды услуг, предоставляемых клиентам сетей связи; источники нагрузки и требуемые ресурсы транспортной сети; технологии

сжатия сигналов; подходы к определению безопасности оптических транспортных сетей.

Во 2 главе дается краткая характеристика моделей и технологий оптических транспортных сетей: модель сети SDH последнего поколения и её особенности; модель сети ATM; модель сети OTN-OTH, основанная на режиме одноканальной и многоканальной оптической передачи при мультиплексировании с разделением по длине волны WDM (Wavelength Division Multiplexing); модель сети EoT, основой которой стали стандарты Ethernet. Показано логическое содержание оптической мультисервисной транспортной платформы и её ориентация на пакетный трафик.

В 3 главе рассматривается сущность построения аппаратуры транспортных сетей с точки зрения физического исполнения и логических программируемых функций. Приводятся примеры обозначений сетевых элементов на схемах организации связи и указывается на соотношение между обозначениями и реальным наполнением оборудования. Дается характеристика различным структурам построения транспортных сетей (линейные, кольцевые, ячеистые).

В 4 главе рассматриваются технологии и схемы защитных переключений в транспортных сетях. Защита секций мультиплексирования одноканального и многоканального сигналов. Защита соединений на основе виртуальных контейнеров и блоков нагрузки оптических каналов. Защита виртуальных соединений, создаваемых пакетной передачей в ATM и Ethernet. Защита в кольцевых и линейных сетях.

В 5 главе рассматриваются принципы проектирования сети синхронизации. Выбор первичного генератора и первичного источника тактовой частоты. Расчет накопления фазовых дрожаний и выбор схемы распределения тактового синхронизма. Выбор вторичного генератора. Разработка порядка восстановления синхронизации при авариях. Использование показателей качества и приоритетов в схеме синхронизации.

Рассматриваются основные задачи управления транспортными сетями. Системы управления и их использование в транспортных сетях.

В 6 главе рассматриваются основные виды интерфейсов транспортных сетей и их характеристики. Электрические интерфейсы G.703, интерфейсы SDH, Ethernet, CWDM/DWDM и др. Оптические интерфейсы для одноканальной и многоканальной передачи. Рекомендации по их использованию при разработке проектов.

В 7 главе рассматриваются общие принципы проектирования транспортных сетей различного масштаба (крупных городов, внутризональные или региональные, магистральные). Указываются принципиальные отличия по обоснованиям проектов, по применяемым технологиям, по защите и т.д.

В 8 главе приводится обзор современных достижений по автоматизации проектирования оптических транспортных сетей на основе различных транспортных технологий.

В 9 главе приводятся методические указания пошагового проектирования оптической сети от задания до окончательного оформления проекта. Указания сопровождаются примерами сравнительного анализа, расчетов, схемами организации, выбора оборудования и т.д.

В приложения приводятся примеры характеристик интерфейсов, которые необходимы для расчетов и ряд расчётов по оценке OSNR когерентных и некогерентных оптических каналов. Для удобства пользования приводится словарь сокращений на английском языке.

При прочтении необходимо обратить внимание на литературные ссылки, обозначенные в квадратных скобках и ссылки на электронные ресурсы. Это поможет найти необходимые данные и различные методики расчётов.

1. Виды сервисов и источники информационной нагрузки

1.1. Виды сервисов

В первую очередь при разработке проекта необходимо определиться с тем, какие виды услуг будет поддерживать сеть, оценить соотношение различных видов трафика на текущий момент и спрогнозировать ситуацию на ближайшую перспективу. Традиционными задачами, решаемыми при проектировании транспортных сетей относительно услуг, являются:

- передача традиционного трафика телефонии и услуг интегрированных цифровых сетей ISDN (Integrated Services Digital Network);
- передача трафика данных Интернет (для частных лиц и/или компаний); передача трафика данных корпоративных сетей (объединение локальных вычислительных сетей), построенных на технологиях Ethernet, ATM и других;
- передача трафика IP - телефонии (для частных лиц и/или в корпоративной сети);
- передача трафика IP-TV (Internet Protocol-Television), но это не телевидение через Интернет, а только использование протокола IP; суть IP-TV сводится к уменьшению потерь от нелегальных подключений в кабельных сетях; главным достоинством IP-TV является интерактивность видеоуслуг и наличие широкого дополнительных сервисов (VoD - Video-on-Demand, TVoIP - Television over IP, Video Telephony, Information Portals и т.д.);
- передача трафика «Internet Television», где главный принцип состоит в том, каждый правообладатель имеет полноценную возможность размещать свое видео в сети и создавать свой телевизионный канал Интернет;
- передача видеотрафика относительно невысокого качества на скорости до 384 кбит/с (видеоконференции, видеотелефония, видеонаблюдение, видеотрансляции с серверов и т.д.);
- передача видеотрафика от студий телевидения и кабельного телевидения (телевизионное вещание - Broadcast и видео по запросу VoD, от серверов) с высокими скоростями и в различных форматах сжатия (DVB-C, Digital Video Broadcasting Cable, MPEG-2, MPEG-4, Motion Pictures Experts Group);
- поддержка передачи телевидения стандартов DOCSIS (Data over Cable Service Interface Specification): американского, европейского и международных, со скоростными режимами до 52 Мбит/с;
- развитие сети хранения данных SAN (Storage Area Network), ставшей основой формирования концепции «World Wide Storage Area Network» (WWSAN), т.е. всемирной сети хранения данных, которая обеспечит высокоскоростной доступ и хранение данных, распределенных по всему миру;
- развитие виртуальных частных сетей VPN (Virtual Private Network);

- востребована виртуализация пользовательских сервисов с помощью программно-конфигурируемых сетей (SDN, Software Defined Networking) и сетевых функций виртуализации (NFV, Network Function Virtualization) с соответствующей гарантированностью и защищенностью соединений, что поддерживает взрывной рост трафика Интернет - «вещей» (IoT, Internet of Things,), количество которых растет с каждым днем.
- соединения между центрами обработки данных (ЦОД) различного назначения (корпоративные, коммерческие, государственные).

Существующие сегодня тенденции к объединению в единый пакет услуг **Triple Play** (три в одном: аудио, видео и передача данных) большинства из перечисленных сервисов обусловлены реальным и прогнозируемым спросом рынка, и также конкурентной борьбой между провайдерами услуг. Так операторы сетей кабельного телевидения и традиционные телефонные операторы активно предлагают своим абонентам доступ в Интернет, а крупные провайдеры Интернет организуют альтернативные сети IP-телефонии, IP-телевидения и т.д.

1.2. Источники нагрузки и требуемые ресурсы транспортной сети

Традиционными источниками нагрузки для транспортных сетей принято считать сети с телефонным трафиком, сети ISDN, локальные компьютерные сети, системы передачи PDH и т.д. Требуемые ресурсы транспортных сетей для этого контента и других представлены в табл.1.1.

Сеть хранения SAN консолидирует ресурсы внешней памяти и аккумулирует весь обмен данными между серверами и системами хранения, обеспечивает повышение производительности ввода/вывода, упрощает управление ресурсами хранения, позволяет использовать их с большей эффективностью, дает дополнительные гарантии надежности хранения. Для реализации эффективного обмена данными в SAN необходимо использование технологий IP/Ethernet/WDM, ESCON (Enterprise Systems Connection – соединение учреждений систем), FICON (Fiber CONnection – волоконное соединение для передачи данных) и др.

Видео по требованию (VoD) легко может перейти в разряд услуг, называемых термином «killer application» – поглотитель приложений. Однако для успешного внедрения этой услуги, требуются сети, позволяющие передавать огромное количество цифровой информации (видео в формате MPEG) от видеосервера к абоненту (10-ки и 100-ни одновременных подключений). Эта задача требует применения новых технических решений, позволяющих максимально эффективно и недорого использовать транспортные сети. Для реализации рентабельной VoD-сети следует использовать передовые технологии: GigabitEthernet, MPEG-over-IP и WDM.

Виртуальные частные сети (VPN) создаются в интересах отдельных компаний средствами маршрутизации пакетов в общей транспортной среде на основе протоколов IP, MPLS, например, это сети малых предприятий SOHO (Small Office-Home Office), в которые объединяются территориально разнесённые офисы. Также это сети банков, промышленных предприятий, межвузовские сети, сети телемедицинских услуг и т.д.

Центры обработки данных (ЦОД), определены как понятия в базовом стандарте TIA/ANSI на требования к инфраструктуре — ANSI/EIA/TIA-942 (Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers), утвержденном в 2005 году в США, где освещается широкий круг вопросов, связанных с организацией ЦОД. Все ЦОД делятся стандартом TIA-942 на четыре уровня (класса). Помимо американского стандарта существует стандарт европейской организации UpTime Institute, в котором ЦОДы также поделены на четыре класса [9].

Первый класс ЦОД не имеет никаких дублирующих активных компонент и распределения потоков. Плановые работы возможны только при остановке ЦОД.

Второй класс ЦОД предполагает дополнительные компоненты (N+1) активного оборудования (UPS, кондиционеры, сетевое оборудование) и только один поток распределения. Во время проведения профилактических работ ЦОД останавливается.

В третьем классе ЦОД оборудование дублируется по принципу N+1. Дублируется распределение потоков: трубопроводы охлаждения, каналы связи в здании, электропитание. Выполняя профилактические работы нет необходимости отключения ЦОД. Центр находится в отдельном выделенном здании, территория – огорожена.

В четвёртом классе ЦОД дублируется как активное оборудование, так и распределение потоков. ЦОД сохраняет работоспособность при отказе любого узла инфраструктуры. ЦОД представляет собой отдельное здание. Обычно ЦОД 4 класса строятся для больших корпораций и государственных структур.

В понятие «дата-центр» в российской компании обозначает имеющиеся серверы, системы хранения и сеть доступа при отсутствии системы жизнеобеспечения, мониторинга и управления. Разница в понимании того, что считать ЦОДом, сильно осложняет оценку их количества в мире, особенно в России. Генерируемые ЦОДами цифровые потоки могут составлять от 100 Гбит/с до петабит (Пбит/с), 10^{15} бит/с.

Нагрузки мультисервисных транспортных сетей могут моделироваться и рассчитываться с определённой точностью, что может служить основанием для определения физических ресурсов в виде ёмкости цифровых трактов, числа волновых каналов, виртуальных каналов и трактов [12, 18].

Пример конструкции устройства для концентрации нагрузки оптической транспортной сети приведен на рис.1.1.

Таблица 1.1. Виды нагрузки и требуемые ресурсы транспортных сетей

Виды нагрузки и скорости		Ресурсы оптических транспортных сетей					
Пользовательская сеть	Скорость Мбит/с	SDH-CCAT		SDH-VCAT		OTN ODU1	OTN ODU2, ODU3, ODU4
		Ресурс	Эффект использования	Ресурс	Эффект использования		
Телефонная сеть ISDN	2,048	VC-12	~94%	VC-12	~94%	—	—
PDH, E3	34,368	VC-3	~70%	VC-3	~70%	—	—
PDH, E4	139,264	VC-4	~93%	VC-4	~93%	—	—
10BASE-FL	10,0	VC-3	~30%	VC-12-5v	~89%	—	—
100BASE-FX	100,0	VC-4	~65%	VC-3-2v	~100%	—	—
1000BASE-LX кодирование 8B/10B	1250	VC-4-16c	~40%	VC-4-7v	~96%	~40%	ODU2 ~11%
10GBASE-LW	9953	VC-4-64c	~100%	VC-4-64v	~100%	—	ODU2 ~100%
100GBASE-FX	100 000	-	-	-	-		ODU4 ~100%
ESCON	200	VC-4-4c	~32%	VC-4-2v	~67%	~8%	ODU2 ~2%
3×ESCON	600	VC-4-4c	~96%	VC-4-3v	~89%	~25%	ODU2 ~6%
FICON	1062	VC-4-16c	~42%	VC-4-8v	~89%	~42%	ODU2 ~10%
HDTV	1485	VC-4-16c	~60%	VC-4-10v	~100%	~60%	~15%
SDH STM-16	2488	—	—	VC-4-17v	~94%	~100%	~25%
SDH STM-64	9953	—	—	VC-4-68v	<100%	—	~100%
ATM STM-1	155,520	VC-4	~100%	VC-4	~100%	—	—
ATM STM-4	622,080	VC-4-4c	~100%	VC-4-4v	~100%	—	—

Интерфейсы пользователей

1000Base-SX (ONS-SE-G2F-SX)

1000Base-LX (ONS-SE-G2F-LX)

1000Base-ZX (ONS-SI-GE-ZX)

1000Base-T (ONS-SE-ZE-EL)

всего до 20

2 агрегатных оптических
интерфейса формата G.709 с FEC
и Ethernet

10G DWDM (ONS-XC-10G-xx.x)

10GE Base-LR (ONS-XC-10G-S1)

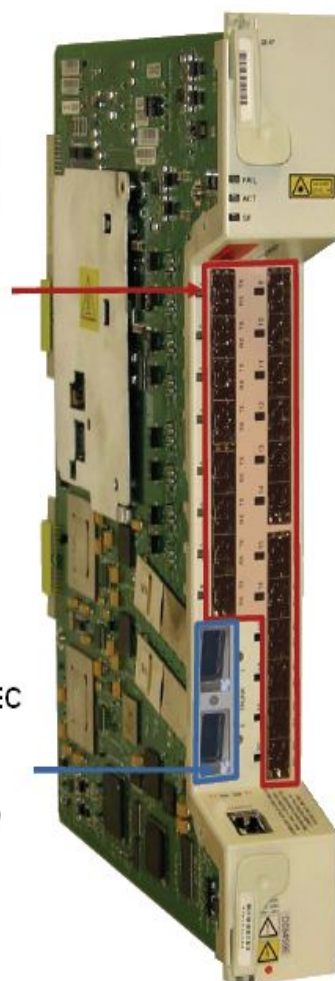


Рис.1.1. Блок концентрации нагрузки Cisco GE XPonder
для оптической сети Ethernet

Подобные блоки входят в состав коммуникационных платформ, например, VSP9000 Nortel с производительностью 27 Тбит/с при размещении в одном шасси до 24 потоков 10 Гбит/с.

1.3. Технологии сжатия сигналов

Технологии сжатия сигналов широко используются при цифровой передаче звуковых (аудио) и видеосигналов и при их записи на различные носители [13].

Процедура сжатия видео данных заключается в слиянии похожих пикселей, расположенных в пределах одного кадра, или рядом в соседних кадрах. Схожие визуальные структуры в разных кадрах выделяются с помощью анализа и сливаются в пределах определенного числа кадров в группы изображений GOP (Group of Pictures). При сжатии аудио сигналов удаляются паузы. Пиксель (pixel) - наименьший элемент цифрового изображения в растровой графике. Имеет квадратную форму. "Pixel" - составное слово из слов "picture" (изображение) и "element" (элемент).

MPEG - общее наименование технологической платформы, созданной Международной Организацией по Стандартизации ISO (International Standards Organisation) и Международной Электротехнической Комиссией IEC (International Electrotechnical Commission). Последняя разработала ряд стандартов для кодирования исходных аудио и видеосигналов, которые и получили общее наименование стандартов MPEG (Motion Pictures Experts Group - Группа Экспертов по Движущимся Изображениям). Группа MPEG занимается стандартизацией технологий сжатия цифровой аудио и видео информации. Стандарты MPEG формируются на основе общей базовой структуры, допускающей достаточно большую свободу конфигураций, и имеют несколько уровней. Каждый уровень описывает определенные характеристики, и при этом не обязательно включает в себя номер версии.

Стандарт **MPEG-2** охватывает технологии, реализованные в любом DVD-плеере и во всех системах цифрового телевидения. Платформы цифрового телевидения высокой четкости используют MPEG-2 формата MPHL (Main Profile at High Level - основной профиль на высоком уровне) при следующих скоростях передачи: 15 Мбит/с в формате 720p50 (720 строк, p, progressive – прогрессивный формат записи, 50 кадров в секунду) и 19 Мбит/с в формате 1080i25 (1080 строк, i, interlaced – запись через строку, 25 кадров в секунду). Стандарт MPEG-2 предназначен для обработки видеоизображения, соизмеримого по качеству с телевизионным изображением, при пропускной способности системы передачи данных в пределах от 3 до 19 Мбит/с. В телевидении используют и большие потоки до 50 Мбит/с. На технологию MPEG-2 переходят многие телеканалы. Сигнал, сжатый в соответствии с этим стандартом, транслируется через телевизионные спутники и наземные сети, используется для архивации больших объёмов видеоматериала. Стандарт **MPEG-3** был предназначен для использования в системах телевидения высокой чёткости HDTV (High-Defenition Television) со скоростью потока данных 20-40 Мбит/с, но позже стал частью стандарта MPEG-2 и отдельно теперь не упоминается. Формат **MP3**, который иногда путают с MPEG-3, предназначен

только для сжатия аудиосигнала и полное название MP3 обозначает MPEG Audio Layer 3.

MPEG-4 - новый стандарт для сжатия любой мультимедийной информации. При передаче сигналов HDTV, используется схема сжатия MPEG-4/H.264, известная как AVC (Advanced Video Coding). В качестве технологического формата стандарт MPEG4 включает различные мультимедийные платформы и будет использоваться в Интернете и в мобильных телефонах. Переход со стандарта MPEG2 на более экономичный стандарт MPEG4 позволит высвободить до 30% ресурсов транспортировки. Скорость передачи HDTV-сигналов будет составлять в этом случае всего 3-10 Мбит/с.

Для передачи оцифрованных речевых сигналов используются различные виды модуляции: импульсно-кодовая ИКМ (стандарт G.711, полоса частот сигнала около 3 кГц) на скорости передачи 64 кбит/с; адаптивная дифференциальная импульсная АДИКМ (стандарты G.721, G.726) на скорости передачи 16 и 32 кбит/с. Также применяется кодирование с линейным предсказанием LPC (Linear Predictive Coding, стандарты G.723, G.728, G.729) на скорости передачи 2.8 кбит/с, 4.8 кбит/с, 8 кбит/с с приемлемым качеством речи. Для передачи оцифрованной речи с повышенным качеством в полосе частот до 7 кГц используется АДИКМ стандарта G.722, где предусмотрена скорость 64 кбит/с.

1.4. Безопасность оптических транспортных сетей

Безопасность транспортных сетей относительно недавно стала предметом пристального внимания разработчиков стандартов и аппаратуры. Проблемы безопасности сетей связи рассмотрены в ряде рекомендаций МСЭ-Т. В этих рекомендациях классифицируются возможные угрозы для передачи информации и методы снижения или исключения их неблагоприятных последствий. Изучение этих рекомендаций и некоторых других документов позволяет ответить на ряд сложных вопросов.

Что должен представлять разработчик проекта мультисервисной оптической транспортной сети с точки зрения её защищённости от злонамеренных вмешательств в функционирование сети и в передаваемую информацию? Какие меры необходимо предусмотреть для защиты соединений пользователей транспортной сети? Как избегать длительных простоев в случае повреждения отдельных видов оборудования и линий связи? Как оперативно произвести реконфигурацию транспортной сети под запросы пользователей? И так далее.

Ответы на эти и многие другие вопросы относительно безопасности проектируемой сети не уместятся в рамках ограниченного по объёму учебного пособия. Поэтому следует обратиться к руководящим документам отрасли [20] и международным стандартам [16].

В рекомендации МСЭ-Т X.805 определены восемь параметров безопасности и возможные угрозы.

1. Управление доступом как параметр безопасности обеспечивает защиту от несанкционированного использования ресурсов сети. Управление доступом гарантирует, что только уполномоченный персонал или уполномоченные устройства будут допущены к сетевым элементам, хранимой информации, информационным потокам, услугам и приложениям.

2. Аутентификация как параметр безопасности служит для подтверждения идентичности объектов связи. Аутентификация гарантирует достоверность заявленной идентичности объектов, участвующих в связи (например, физического лица, устройства, услуги или применения), а также гарантирует, что объект не пытается выдать себя за другой объект или воспроизвести несанкционированным образом предыдущее сообщение.

3. Сохранность информации как параметр безопасности обеспечивает средства для предотвращения отрицания физическим лицом или объектом факта совершения им конкретного действия в отношении данных посредством предъявления имеющегося доказательства различных действий, связанных с сетью (таких как доказательство обязательства, намерения или совершения; доказательство происхождения данных, доказательство права собственности, доказательство использования источника). Этот параметр обеспечивает наличие доказательств, которые могут быть предъявлены третьему лицу и использоваться в подтверждение того, что произошло какое-либо событие или совершено какое-либо действие.

4. Конфиденциальность данных как параметр безопасности обеспечивает защиту данных от несанкционированного раскрытия. Этот параметр гарантирует, что содержание данных не будет понято неуполномоченными объектами. Для обеспечения конфиденциальности данных используются, как правило, такие методы, как шифрование, списки управления доступом и право на доступ к файлу.

5. Безопасность связи как параметр безопасности гарантирует, что информация передается только между уполномоченными конечными точками (информация не изменяет направления и не перехватывается при передаче между этими конечными точками).

6. Целостность данных как параметр безопасности обеспечивает правильность и точность данных. Данные защищены от несанкционированного изменения, удаления, создания и дублирования, а также обеспечивается указание на такие несанкционированные операции.

7. Готовность как параметр безопасности обеспечивает, что вследствие влияющих на сеть событий не возникнет отказа в санкционированном доступе к элементам сети, хранимой информации, потокам данных, услугам и приложениям. В эту категорию включены варианты восстановления после аварий.

8. Секретность как параметр безопасности предусматривает защиту информации, которая могла бы быть получена на основе наблюдения за

сетевыми операциями. Примерами такой информации являются веб-сайты, которые посетил пользователь, географическое расположение пользователя, IP-адреса в сети поставщика услуг.

Угрозы бывают случайными или умышленными и могут быть активными или пассивными. Случайная угроза – это угроза без какого-либо преднамеренного умысла, как, например, ошибка в системе или программе или физический сбой оборудования, случайное повреждение линии. Умышленная угроза – это угроза, которая реализуется неким объектом, совершающим преднамеренное действие, например террористический акт. Если реализуется умышленная угроза, она называется атакой. Активная угроза – это угроза, которая приводит к некоторому изменению состояния, такому как изменение данных или разрушение оборудования. Пассивная угроза не приводит к изменению состояния. Примером пассивной угрозы является перехват информации. Уязвимость защиты представляет собой результат ошибки или дефекта, которыми можно воспользоваться с целью нарушения системы или содержащейся в ней информации (рекомендация МСЭ-Т X.800). Уязвимость позволяет реализовать угрозу.

С точки зрения построения транспортных сетей предметом внимания проектировщика, прежде всего, должны быть проблемы защиты аппаратуры и линейных сооружений от возможных угроз повреждений физических и разрушений конфигурируемых соединений. К возможностям защиты относится решение по построению секций мультиплексирования с защитой 1+1, 1:n и m:n, построение схем защиты соединений в однонаправленном и двунаправленном кольцах (MS-SPRing, SNCP), в линейных и смешанных конфигурациях, и т.д. Для решения задач защиты необходимо изучить рекомендации МСЭ-Т: G.805, G.808.1, G.841, G.842, G.873.1, I.630, G.8031, G.813. Кроме того, необходимо изучить документацию на проектируемое оборудование. Указанные рекомендации охватывают все известных технологий транспортных сетей (SDH, ATM, OTN-OTH, Ethernet, TP-MPLS). Также необходимо учесть возможности средств управления транспортными сетями, изложенными в рекомендациях МСЭ-Т серии M (M.3010, M.3100 и т.д.) и в соответствующей технической документации производителей.

Контрольные вопросы

1. Какие виды услуг электросвязи должны поддерживать оптические транспортные сети?
2. Что обозначает Triple Play?
3. Что признано считать традиционными источниками нагрузки транспортных сетей?
4. Какое назначение имеет сеть SAN?
5. С какой целью создаются сети VPN?
6. Какое назначение имеют ЦОД?
7. Чем отличаются классы ЦОД?

8. Что следует понимать под ресурсом транспортной сети?
9. Какие скоростные потоки требуется передавать в каналах оптической транспортной сети?
10. С какой целью используются технологии сжатия сигналов?
11. Какой стандарт сжатия сигналов применяется в цифровом телевидении?
12. Почему необходимо рассматривать проблемы безопасности оптических транспортных сетей?
13. Что следует понимать под угрозой сети электросвязи?
14. Что необходимо изучить для понимания степени угроз безопасности оптической транспортной сети и обеспечить разработку соответствующих мер защиты?

2. Модели и технологии оптических транспортных сетей

Транспортные сети строятся в соответствии с моделями (рис.2.1), предложенными в рекомендациях МСЭ-Т:

- транспортная сеть SDH, рекомендации G.707, G.783, G.803, G.841 и др.;
- транспортная сеть АТМ (асинхронный режим передачи), рекомендации I.311, I.326, I.432, I.630 и др.;
- транспортная сеть OTN-OTN (оптическая транспортная сеть – оптическая транспортная иерархия), рекомендации G.709, G.798, G.872, G.873.1 и др.;
- транспортная сеть Ethernet EoT, рекомендации G.8010, G.8011, G.8012 и др.

Указанные модели имеют общие черты: иерархическое уровневое построение, где каждый уровень имеет самостоятельный и независимый от других уровней набор функций; наличие физического уровня, представляемого системой передачи с организацией секций; образование трактов (маршрутов) физического и виртуального происхождения; уровня взаимодействия с пользователем транспортной сети.

Что дает модельное уровневое построение транспортных сетей при проектировании? Скорее всего чёткое представление о аппаратных, алгоритмических и сетевых возможностях по организации взаимодействий при передаче информации, т.е. о транспортной технологии, например, поперечной совместимости оборудования различных производителей и оборудования различных стандартов мультиплексирования и передачи.

Ниже приводятся отдельные характеристики моделей и технологий мультиплексирования, дается их сравнительная оценка, указывается на их совместимость в мультисервисной транспортной платформе. Для достаточного понимания материала главы необходимо изучить учебную литературу [1].

2.1. Транспортная сеть SDH

Модель транспортной сети SDH представлена тремя самостоятельными по своей организации уровнями: уровень среды передачи; уровень трактов (маршрутов передачи информации); уровень каналов.

Уровень среды передачи (рис. 2.2) базируется преимущественно на оптоволоконных линиях (среда передачи), в которых создаются секции регенерации цифровых линейных сигналов и секции мультиплексирования цифровых данных, поддерживаемые соответствующими секционными заголовками RSOH (Regeneration Section Overhead) и MSOH (Multiplex Section Overhead). Среда передачи содержит: стекловолокна в конструкциях различных кабелей; электрооптические преобразователи на передаче и оптоэлектронные преобразователи на приеме; оптические усилители, оптические аттенюаторы и компенсаторы дисперсии; разъёмные и неразъёмные оптические соединители; линейные кодеры и декодеры; оптические модуляторы и оптические детекторы.

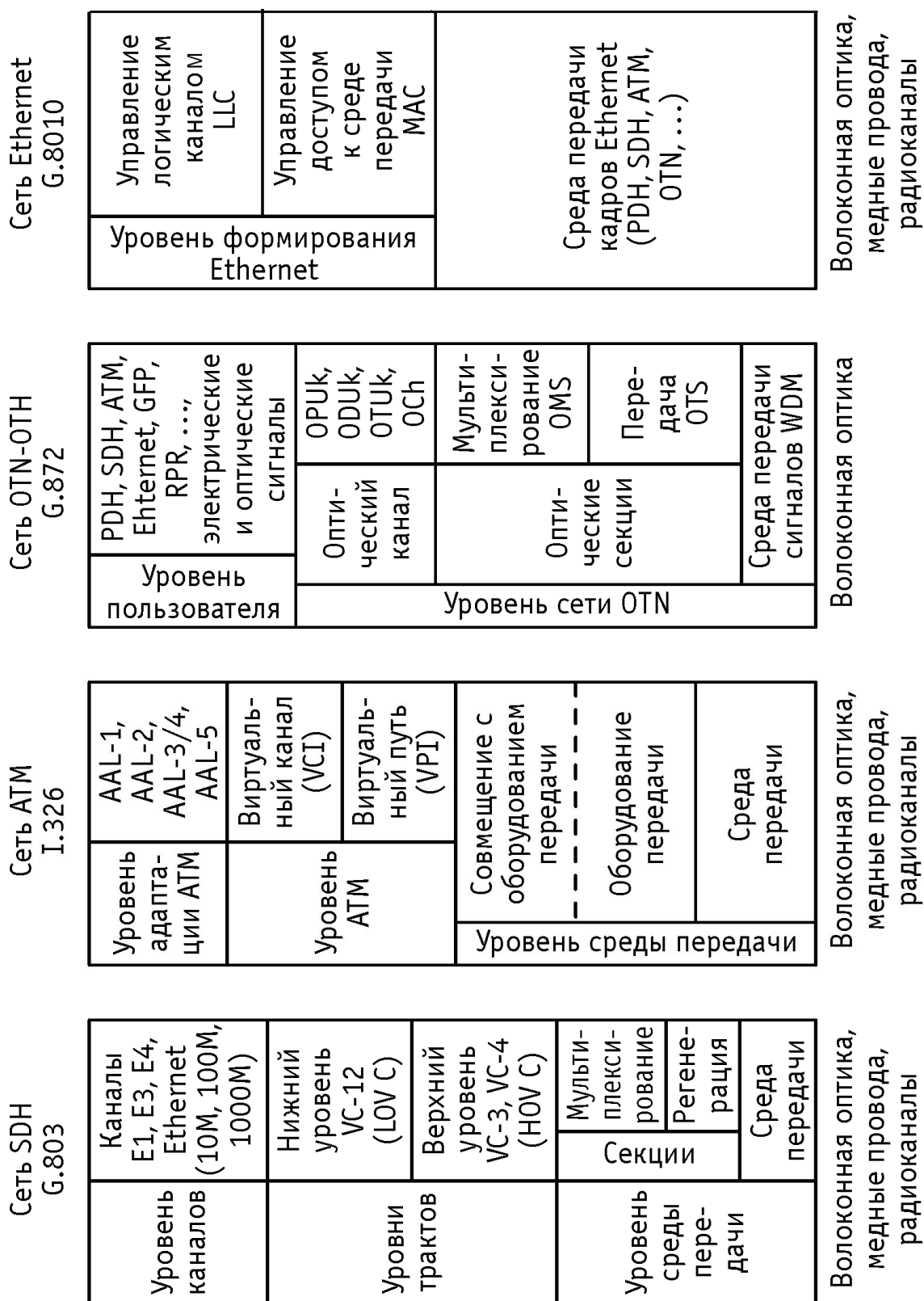


Рис.2.1 Модели транспортных сетей связи, определенные МСЭ-Т

Секцией мультиплексирования начинается и заканчивается участок волоконно-оптической системы передачи. Секция мультиплексирования может содержать от одного до нескольких участков – секций регенерации, которые необходимы для устранения искажений линейных импульсных сигналов и восстановления их формы и мощности. Секции регенерации и мультиплексирования являются предметом проектных расчетов в интерфейсных точках подключения передачи S и приёма R, построений и технической эксплуатации. Для этого в рамках стандартизации SDH предусмотрены служебные сообщения по контролю качества передачи по битовым ошибкам, служебная связь, каналы управления и синхронизации. Секция мультиплексирования вместе с входящими в неё секциями регенерации может дублироваться с целью гарантированной защиты от повреждений.

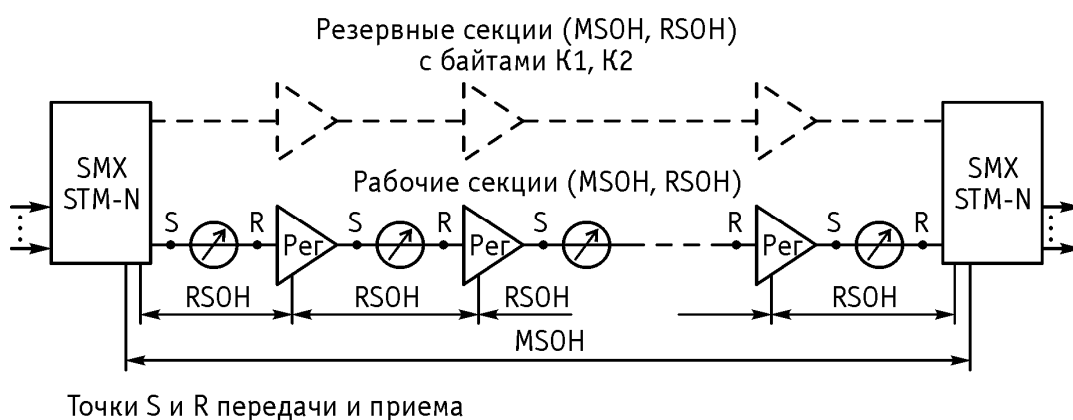


Рис. 2.2. Уровень среды передачи SDH

Для этого дублирующая (защитная) секция оснащается сигналами автоматического переключения (байты K1, K2) за интервал времени не более 50 мс. Сигналы, передаваемые через физическую среду модели сети SDH, представляют собой циклы длительностью 125 мкс, называемые синхронными транспортными модулями STM-N (Synchronous Transport Module) порядка $N = 0, 1, 4, 16, 64, 256$; где порядок характеризует иерархический уровень и соответствующий скоростной режим передачи (рис.2.3). Любая из иерархических скоростей STM-N вычисляется простой операцией умножения, например, STM-1 имеет емкость $270 \times 9 = 2430$ байт, которая повторяется 8000 раз за 1 секунду, а число бит составит $2430 \text{ байт} \times 8000 \times 8 = 155\,520\,000 \text{ бит/с}$.

Другие иерархические скорости получаются умножением $155520000 \times N$, т.е. на 4, 16, 64 и 256.

Подробные сведения по формированию этих структур и их содержанию рассмотрены в [1].

Уровни трактов сети SDH представлены двумя плоскостями: высокого и низкого уровней (порядков), стандартно обозначаемых в технической литературе: HOV-C (Higher Order Virtual Container) – виртуальный контейнер

высшего уровня и LOV-C (Lower Order Virtual Container) – виртуальный контейнер низшего уровня.

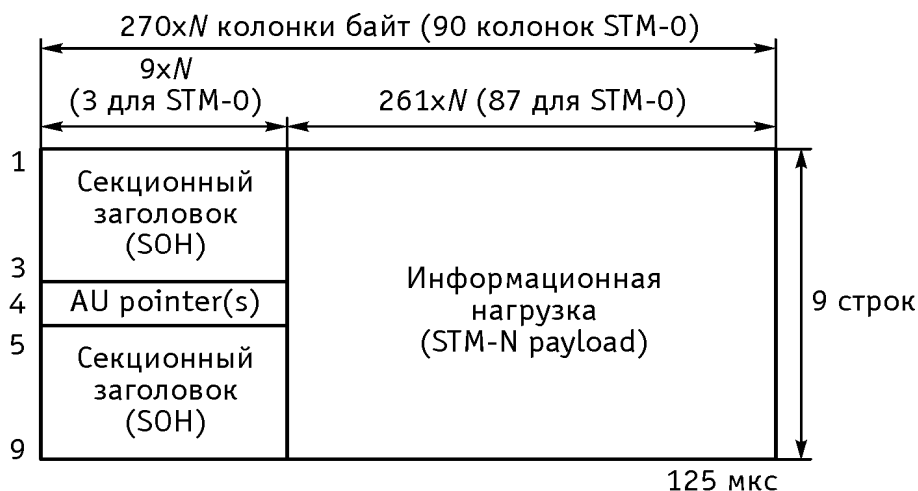


Рис. 2.3. Структура синхронного транспортного модуля STM-N

Виртуальные контейнеры высокого и низкого уровней представляют собой циклические цифровые ёмкости, предоставляемые под загрузку информационными данными с подходящими скоростями. Виртуальные контейнеры низкого порядка могут объединяться для размещения в виртуальные контейнеры высокого порядка. Понятие «виртуальности» этим цифровым блокам присвоено из-за специальных данных, называемых заголовками, в которых прописывается уникальный маршрутный идентификатор для адресного переноса каждого контейнера через транспортную сеть от источника информации до получателя, ведется контроль качества передачи из конца в конец и по отдельным участкам маршрута, вставляются сообщения о необходимости защитных переключений, вставляются сообщения о виде информационных данных, поддерживается служебная связь и т.д.

Виртуальные контейнеры могут сцепляться для переноса нестандартных информационных нагрузок (табл.2.1). Сцепки виртуальных контейнеров подразделяются на последовательные (VC-4-Xc) и виртуальные (VC-4-Xv).

Благодаря непрерывной циклической передаче виртуальных контейнеров может поддерживаться однонаправленное и двунаправленное транспортное соединение – тракт или маршрут, рассчитываемое на различную пропускную способность в интересах потребителей транспортных услуг. Эти соединения могут проходить через различные системы передачи SDH (волоконно-оптические и радиорелейные) с различными иерархическими уровнями STM-N.

Таблица 2.1. Иерархия виртуальных контейнеров в SDH

VC -тип	VC - нагрузка(кбит/с)	Шаг (кбит/с)
VC-11	1 600	
VC-12	2 176	
VC-2	6 784	
VC-3	48 384	
VC-4	149 760	
VC-4-4с	599 040	
VC-4-16с	2 396 160	
VC-4-64с	9 584 640	
VC-4-256с	38 338 560	
VC-11-Xv, X = 1 до 64	1 600 to 102 400	1 600
VC-12-Xv, X = 1 до 64	2 176 to 137 088	2 176
VC-2-Xv, X = 1 до 21	6 784 to 142 464	6 784
VC-3-Xv, X = 1 до 3	48 384 to 145 152	48 384
VC-4-Xv, X = 1 до 256	149 760 to 38 338 560	149 760

Уровень каналов сети SDH обеспечивает интерфейсы для пользователей транспортной сети. Учитывая, что транспортная сеть SDH является частью первичной сети связи, на уровне каналов производится согласование с вторичными сетями (пользователями), например, с телефонными сетями через потоки цифровых данных 2.048 Мбит/с (обозначается E1), с компьютерными сетями Ethernet на скоростях передачи 10, 100 и 1000Мбит/с через сцепки виртуальных контейнеров и протоколы согласования LAPS (Link Access Procedure SDH), GFP (Generic Framing Procedure). Все процедуры формирования цифровых блоков SDH происходят с использованием единого высокостабильного тактового механизма – тактовой сетевой синхронизации (TCC). Создание и поддержка всех соединений в сети SDH и контроль всех функций обеспечиваются системой управления, имеющей сеть выделенных каналов связи и средства протокольного взаимодействия через эти каналы.

2.2. Транспортная сеть АТМ

Модель транспортной сети АТМ представлена тремя самостоятельными по своей организации уровнями: уровень среды передачи; уровень асинхронного режима передачи АТМ; уровень адаптации АТМ.

Уровень среды передачи в транспортной сети АТМ может быть реализован согласно стандартов АТМ (I.432) любой системой передачи, например, системой PDH или системой SDH. Допускается также использование любой

среды и оборудования передачи (медные провода с модемами, радиоканалы с радиочастотными модемами, атмосферные оптические каналы, волоконно-оптические системы).

Уровень АТМ разбит на подуровни виртуального канала и виртуального пути. Эти подразделения уровня АТМ обусловлены форматом представления данных, называемых ячейками и имеющими ёмкость 53 байта, которая поделена на поле заголовка (5 байт) и поле нагрузки – сегмент пользователя (48 байт). Заголовок содержит идентификаторы ячеек, принадлежащих одному соединению (рис.2.4), виртуальному пути VPI (Virtual Path Identifier) и виртуальному каналу VCI (Virtual Circuit Identifier).

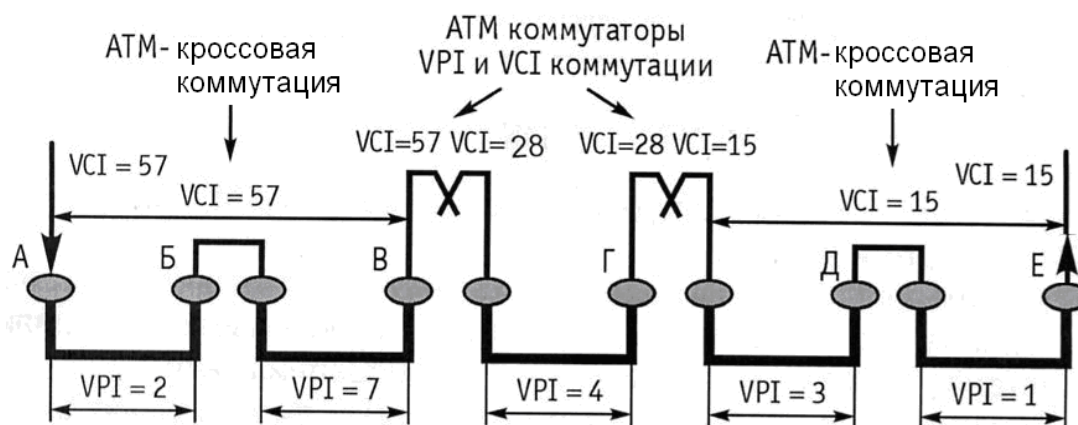


Рис. 2.4. Соединение в транспортной сети АТМ

Благодаря этим идентификаторам ячейки в общем потоке различаются при демультиплексировании и коммутации. В коммутаторах для выполнения коммутаций прописываются все идентификаторы в виде таблиц маршрутизации, по которым входящие ячейки идентифицируются и транслируются на нужные выходы с последующим мультиплексированием в новые потоки участка сети. Потоки ячеек АТМ формируются случайно во времени в силу случайности поступления информационных сообщений, упакованных в сегменты. При этом потоки случайных ячеек, происходящих от различных источников, статистически мультиплексировуются в общий неслучайный поток данных, согласуемый с уровнем среды передачи функциями совмещения с оборудованием передачи. В общий поток информационных ячеек могут включаться и ячейки служебного назначения, например, для управления в сети, для контроля перегрузок коммутаторов, для тестирования и т.д. На уровне среды передачи поток ячеек синхронно байт за байтом размещается в циклы передачи, например, в циклы E1, E3 PDH или в циклы виртуальных контейнеров SDH.

Уровень адаптации АТМ выполняет функции интерфейса между транспортной сетью АТМ с её виртуальными соединениями и пользователями транспортных услуг (вторичными сетями связи), например, телефонными сетями, сетями Internet, локальными сетями Ethernet и т.д. При этом различным видам трафика определены различные типы уровневой адаптации AAL (AAL-1,

AAL-2, AAL-3/4, AAL-5, ATM Adaptation Level), предусматривающие формирование различных по структуре сегментов для пользовательской нагрузки. Пользовательская информация, поступающая непрерывным потоком данных или случайными во времени пакетами, приспосабливается к процессу формирования сегментов, т.е. происходит согласование битовой скорости, исключаются неинформативные, т.е. пустые интервалы, формируются коды исправления ошибок для приёмной стороны и т.д.

Развернутая картина формирований потока ячеек в модели транспортной сети ATM представлена на рис. 2.5.

Принципиальное отличие моделей транспортных сетей SDH и ATM состоит в следующем:

- транспортный ресурс сети SDH – тракт высокого или низкого порядка предоставляется в распоряжение пользователя (вторичной сети связи) постоянно, независимо от информационного потока и с фиксированной скоростью передачи, что часто является причиной низкой эффективности использования соединения, например, в телефонии с коммутацией каналов при активности канала от 0.1 до 1.0;

- транспортные ресурсы сети ATM – виртуальный канал или виртуальный путь, поддерживаемые коммутаторами с маршрутными таблицами каждого соединения, предоставляются в распоряжение пользователя (вторичной сети связи) только при наличии потока информационной нагрузки, т.е., когда ячейки ATM формируются и следуют через физическую среду. В противном случае среда передачи предоставляется потокам ячеек других источников благодаря статистическому мультиплексированию на уровне ATM. Это позволяет в несколько раз повысить эффективность использования физического соединения, например, тракта SDH.

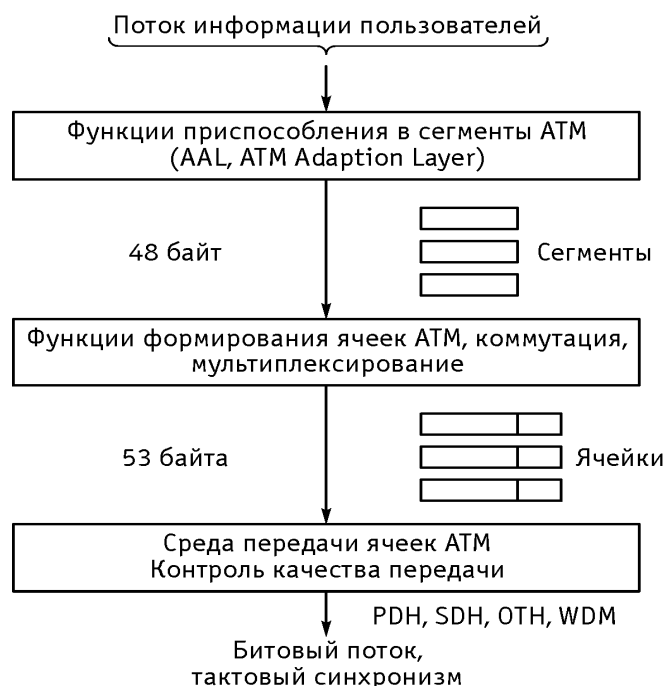


Рис. 2.5. Формирование потока ячеек транспортной сети ATM

2.3. Транспортная сеть OTN-OTN

Модель транспортной сети OTN-OTN представлена двумя самостоятельными по своей организации уровнями: уровень сети OTN и уровень пользователя.

Уровень сети OTN состоит из трёх физически и логически связанных подуровней (рис.2.6): среды передачи сигналов с разделением по длине волны WDM; оптических секций ретрансляции OTS (Optical Transmission Section) и мультиплексирования OMS (Optical Multiplex Section); оптических каналов OCh (Optical Channel) с нагрузкой в виде оптических транспортных блоков OTUk (Optical Transport Unit k) с включением в них блоков данных оптических каналов ODUk (Optical Data Unit k), которые, в свою очередь, включают блоки полезной нагрузки оптических каналов OPUk (Optical Channel Payload Unit k). Индекс k соответствует иерархической ступени OTN ($k=1,2,3,4$) и указывает на циклы различные по длительности и скорости передачи.

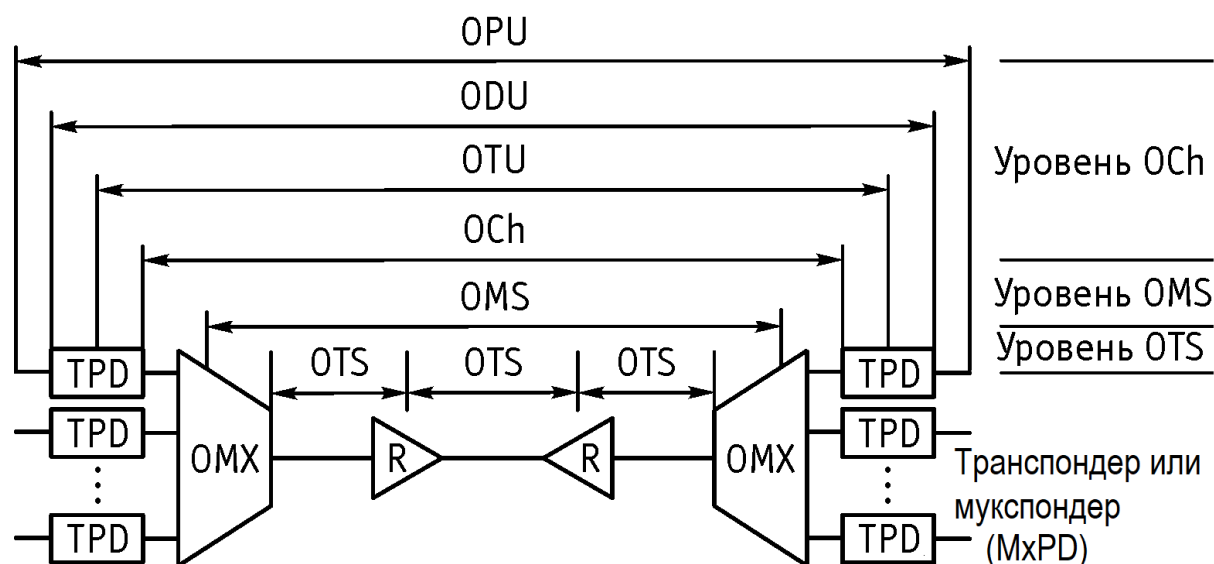


Рис. 2.6. Соединение в транспортной сети OTN

Оптические секции базируются на ресурсах одномодовых волоконных световодов со стандартными характеристиками и огромной полосой частот передачи, которая достигает примерно от 30 ТГц до 60 ТГц в диапазоне волн 1260-1675 нм для различных типов волокон. Этот диапазон используется в режиме WDM. При этом число волновых каналов может реализовываться от 2-4 OCh до нескольких сотен OCh, объединяемых мультиплексорами (OMX) в оптические волновые (транспортные) модули OTM (Optical Transport Module) ёмкостью до 32 OCh в каждом и возможно больше. Т.о. среда передачи в этой модели транспортной сети позволяет достигать скоростей передачи порядка 10 Тбит/с и более при скорости передачи в каждом из волновых каналов от 2.5 до 100 Гбит/с, а в перспективе до 1,2 Тбит/с (рис.2.7) с использованием

когерентного приёма, двойной поляризации (PDM), фазовых (xPSK) и квадратурных (xQAM) форматов модуляции, коррекции ошибок FEC, суперканальных организаций несущих частот.

Оптические секции ретрансляции OTS организуются внутри оптической секции мультиплексирования OMS для компенсации потерь оптической мощности в стекловолокне и компенсации дисперсионных искажений. Эти функции обеспечивают линейные оптические примесные волоконные усилители с эквалайзерами (обозначено на рис.2.9 R), рамановские оптические усилители и компенсаторы хроматической и поляризационной дисперсии, а в перспективе полностью оптические регенераторы 2R и 3R, волновые конверторы и схемы цифровой обработки канальных сигналов.

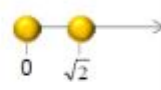
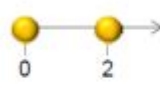
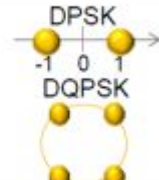
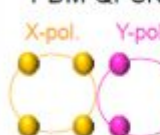
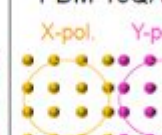
Время : 1980	1990	2000	2010	2020	
Скорость в канале	2,5Гбит/с	10Гбит/с	40Гбит/с	100Гбит/с	200/400Гбит/с и 1Тбит/с...
Типовые модуляционные форматы	OOK (NRZ) 	OOK (RZ) 	DPSK DQPSK 	PDM-QPSK X-pol. Y-pol. 	PDM-16QAM X-pol. Y-pol. 
Системные возможности	Одна секция Один канал	Много секций с EDFA, много каналов WDM	DWDM, усилители Рамана и ROADM	1:N WSS, CDC-ROADMs	Flexible-grid WDM, M:N WSS
Ёмкость системы передачи	2.5 Gb/s (один канал)	400 Gb/s (40 WDM каналов)	1.6 Tb/s (40 WDM каналов)	8 Tb/s (80 DWDM каналов)	20 Tb/s (50 flexible-grid WDM каналов)
Типовая дистанция	100 km (single span)	1000 km	1000 km @40G 3000 km @10G	2000 km @100G	4000/2500 km @100(200)G
Возможные технологии	Optical modulation and detection	High-speed modulation, HD-FEC	Differential phase-shift-keying	Coherent detection with ODSP	SD-FEC, PDM-QAM, FTN, Superchannel

Рис. 2.7. Развитие скоростных возможностей оптических каналов

В оптической секции мультиплексирования формируются, передаются, обслуживаются и расформируются отдельные оптические каналы, оптические волновые модули OTM с числом каналов до 32 и более (называемые также оптическими транспортными модулями), группы оптических модулей, которые также могут поддерживать режим передачи с гибкой сеткой частот (рис.2.8), предназначенной для формирования суперканалов с регулировкой ёмкости, например, в реализованных интерфейсах от 100 Гбит/с до 400 Гбит/с и в перспективных до нескольких Тбит/с. Каждый оптический модуль может иметь отдельный оптический сервисный канал, в который включаются служебные данные для каждого OCh. Кроме того, в секции оптического мультиплексирования создаётся сервисный оптический канал для обслуживания всей секции и отдельных участков – секций ретрансляции OTS. Секция OMS может иметь гарантированную защиту

благодаря дублированию передачи в альтернативной кабельной линии с соответствующими секциями ретрансляции. Нормированное время защитного переключения составляет 50 мс.

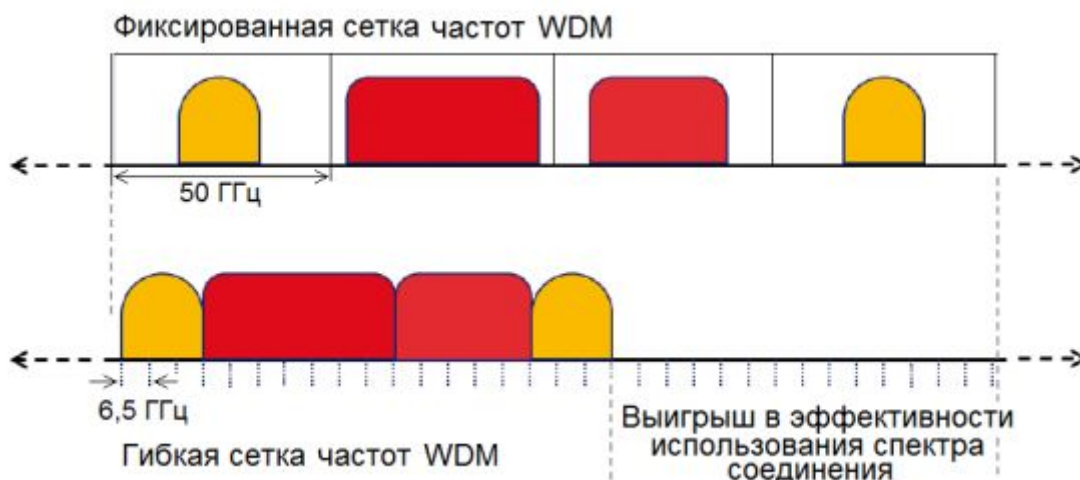


Рис. 2.8. Фиксированная и гибкая сетка оптических частот (по рек. G.694.1)

Оптический канал OCh в оптической сети образуется транспондерными или мукспондерными (мультиплексирующими) блоками (TPD или MxPD) и выполняет функции регенерации цифрового сигнала типа 3R, т.е. восстанавливает амплитуду импульсов (1R), их форму (2R) и устраняет накопленные фазовые дрожания (3R) (рис 2.9). Также производится оптическая модуляция и детектирование, цифровое восстановление, контроль качества передачи цифровых данных в блоках OTUk и ODUk, и т.д.

Уровень сети OTN может поддерживать полностью оптическую сеть с оптической и цифровой коммутацией, маршрутизацией, конвертацией оптических волн и защитой соединений.

Уровень пользователя оптической транспортной сети OTN-OTN выполняет функции интерфейса между транспортной сетью и сетями пользователей транспортных услуг, к которым относятся сети SDH, ATM, Ethernet и др. Для эффективного согласования между сетями применяются различные протокольные решения по размещению данных пользователей в оптических каналах.

Это протоколы: общей процедуры формирования кадра GFP; протокол защищаемого пакетного кольца или пакетного кольца с самовосстановлением RPR (Resilient Packet Ring) и др. Протоколы позволяют согласовать циклическую передачу данных в оптических каналах со случайной во времени передачей пакетов данных различной емкости от пользователей, например, пакеты IP, MPLS или Ethernet.

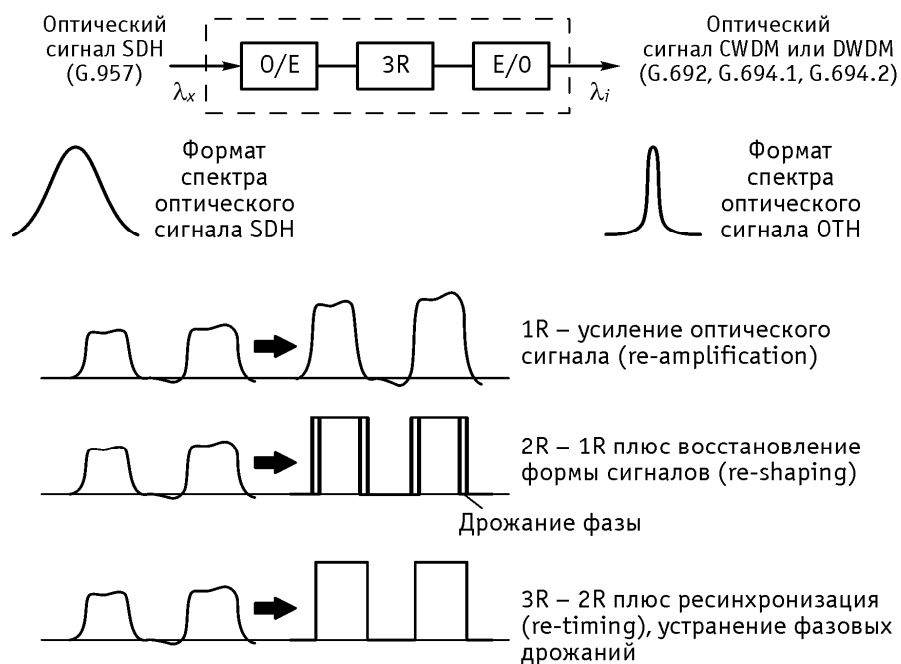


Рис. 2.9. Принцип 3R регенерации в транспондере

Если сравнить три рассмотренные модели транспортных сетей, то можно отметить, что наибольший транспортный ресурс может обеспечить только модель сети OTN-OTH. При этом она поддерживает трансляцию данных сетей SDH, ATM, Ethernet, TP-MPLS. Очевидно, что модель сети OTN-OTH предназначена для глобального масштаба, т.е. магистральных сетей связи с большим объёмом трафика и для сетей связи крупных городов-мегаполисов с развитой телекоммуникационной инфраструктурой.

2.4. Транспортная сеть Ethernet

Среди моделей транспортных оптических сетей модель транспортной сети Ethernet самая последняя по стандартизации МСЭ-Т. Однако эта модель по своему происхождению намного старше по возрасту, ей более 40 лет. Она была разработана для взаимодействия по обмену файлами (пакетами или кадрами данных) между компьютерами в локальной сети при использовании медных проводов, конверторов сигналов и протокола передачи данных с контролем коллизий, т.е. состояний, когда по одной паре проводов одновременно начинали передачу два и более компьютеров. В таком качестве эти сети используются и сегодня на коротких дистанциях, как правило, не превышающих 100 или 200 метров. Появление быстродействующих пакетных коммутаторов и волоконной оптики позволило резко увеличить скорости передачи пакетов (от 10 Мбит/с до 100, 1000 Мбит/с, 10/40 и 100 Гбит/с) и дистанцию передачи до десятков метров и до сотен километров. Модель транспортной сети Ethernet состоит из двух уровней: уровень среды передачи кадров Ethernet и уровень формирования кадров (пакетов) Ethernet.

Уровень среды передачи Ethernet может быть реализован на базе медных проводов, волоконных световодов, радиоканалов и атмосферных оптических каналов с использованием соответствующих конверторов сигналов (приёмопередатчиков), что характерно для локальных и городских сетей связи и это наиболее экономичное решение относительно других моделей транспортных сетей (рис.2.10).

Кадры Ethernet EoT содержат сообщения о типе нагрузки, протокольные метки доступа в подсеть SNAP (Sub-Network Access Protocol), данные контроля логического канала LLC (Logical Link Control) с адаптированными пользовательскими сигналами, метками длины поля пользовательской нагрузки в кадре и типом кадра Ethernet. Транспортировка кадров Ethernet EoT может осуществляться с наблюдением транспортного тракта из конца в конец ETHP (Ethernet end-to-end path) и сегментным мониторингом ETHS (Segment monitoring). Большинство вариантов транспортировки (EoT) уже стандартизированы для интерфейсов PDH, SDH, OTN, ATM (EoP, EoS, EoO, EoA), MPLS (EoM) и RPR (EoR). При организации связи на большие расстояния (более 100 км) уровень среды передачи может быть представлен транспортными сетями SDH, ATM и OTN. В этом случае решение по транспортной сети не отличается от других моделей дешёвой. В сети Ethernet поддерживается тактовый синхронизм. Также возможна реализация функций защитных переключений на резервный путь передачи за интервал времени до 50 мс.

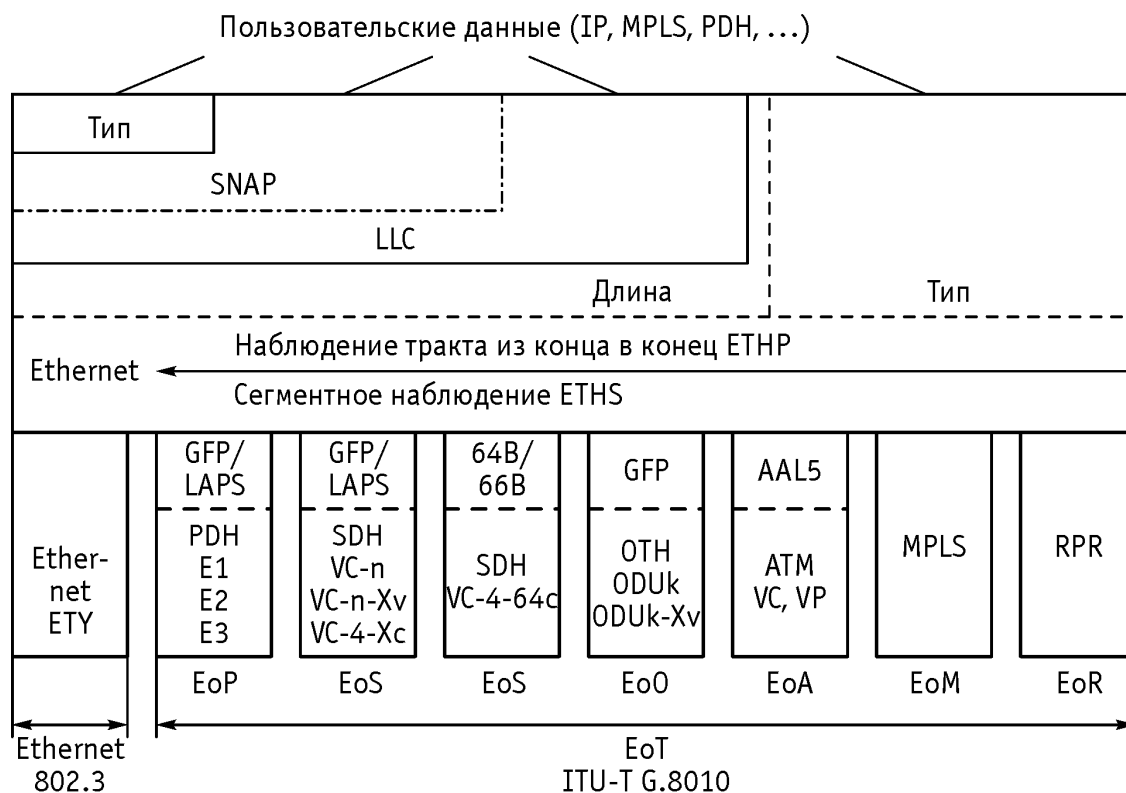


Рис. 2.10. Структуры интерфейсов транспортной сети Ethernet

Уровень формирования кадров (пакетов) Ethernet состоит из двух подуровней: управления логическим каналом LLC (Logical Link Control) и управления доступом к среде передачи MAC (Medium Access Control). Эти подуровни протокольные, т.е. их функции предписаны определенными алгоритмами для процессоров, которые формируют кадры с информационными данными и служебными сообщениями. Кадры с информационными данными создаются и отправляются случайно во времени, т.е. в зависимости от потока информационной нагрузки, или в потоковом режиме, когда нагрузка поступает непрерывно. Мультиплексирование кадров, управление их потоком, коммутация их в узлах, наблюдение соединений по потоку кадров из конца в конец или по участкам сети – всё это исполняет уровень формирования кадров. Также он обеспечивает интерфейс с источниками информационных данных (вторичными сетями, например, сетями IP, MPLS и т. д.).

Схемы мультиплексирования Ethernet различаются степенями мультиплексирования. Общая схема мультиплексирования представлена на рис. 2.11.

Одноступенчатая схема мультиплексирования кадра Ethernet предусматривает объединение до 4096 кадров Ethernet в общий логический путь транспортной сети. Для этого каждый мультиплексируемый кадр получает свою метку пользователя (C-Tag, Customer - Tag), содержащую идентификатор локальной сети, где находится пользователь.

Двухступенчатая схема мультиплексирования предполагает возможность объединения уже мультиплексированной нагрузки на первой ступени с метками C-Tag в количестве M , где число M однозначно не регламентировано. Также кадры Ethernet могут содержать метки провайдеров услуг (S-Tag, Service provider Tag). Такая двухступенчатая схема может обеспечить переход не только к виртуальным локальным сетям, но и создавать мосты между магистралями провайдеров услуг. Это функции сетей PVB/PBT [99], где кадры PBT (Provider Backbone Transport) полностью независимо и самостоятельно генерируются оборудованием транспортной сети оператора, реализующего транспортные услуги. Сеть PBT переносит и гарантированно защищает трафик провайдера.

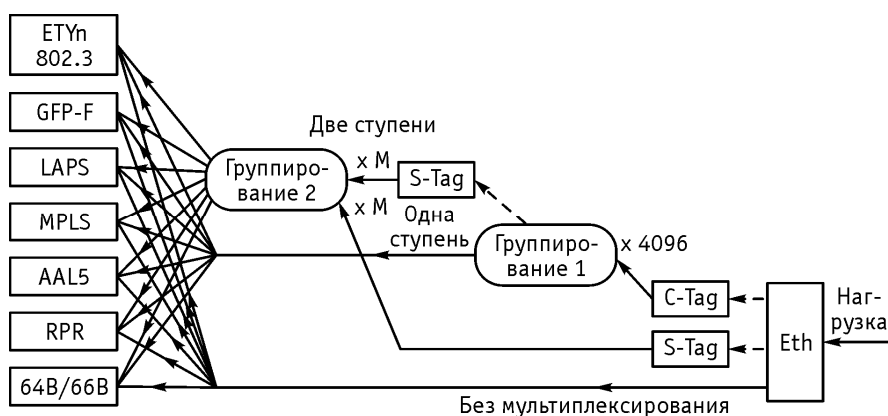


Рис. 2.11. Общая схема мультиплексирования Ethernet

Логическим и своеобразным конкурентным решением развитию модели транспортной сети Ethernet стала модель транспортной сети с пакетной передачей и коммутацией по меткам TP-MPLS (Transport Profile Multi Protocol Label Switching – транспортный профиль многопротокольной коммутации по меткам). Решения по этой технологии представлены рядом рекомендаций МСЭ-Т и IETF (инженерный совет интернета): G.8110 – архитектура уровней сети MPLS; G.8110.1 – применение MPLS в транспортной сети; G.8112 – интерфейс между узлами сети MPLS; G.8121 – функции оборудования MPLS; Y.1720 (G.8131) – защитные переключения в сети MPLS; Y.1711 – механизмы обслуживания и эксплуатации в сети MPLS. Решение TP-MPLS является упрощенным относительно его основания, т.е. технологии MPLS.

Разработка этой модели нацелена на повышение эффективности использования ресурсов магистральных и внутризональных оптических транспортных сетей с технологиями циклической цифровой передачи: PDH, SDH и OTN.

2.5. Отображение моделей и технологий транспортных сетей в оптических мультисервисных транспортных платформах

Современное развитие транспортных сетей связи происходит через интеграцию всех функциональных возможностей, заложенных в модели и технологии транспортных сетей, что привело к созданию универсальных мультисервисных транспортных платформ с электрическими и оптическими интерфейсами, электрической и оптической коммутацией каналов и пакетов. Это обеспечило предоставление любых видов транспортных услуг, включая услуги автоматически коммутируемых оптических сетей с сигнальными протоколами на основе общей многопротокольной коммутации по меткам GMPLS (Generalized Multi Protocol Label Switching).

Развитие широкополосных пакетно-ориентированных услуг и приложений стимулировало разработку новых сетевых решений, получивших название P-OT, Packet-Optical Transport.

На рис. 2.12 представлено отображение рассмотренных моделей и технологий мультиплексирования в общей архитектуре мультисервисной транспортной платформы MSTP (Multi-Service Transport Platform), где указаны возможные источники информационной нагрузки, протоколы согласования и сочетание транспортных технологий. Представление современных транспортных решений в виде платформы привело к созданию ещё одного класса оборудования – мультисервисных платформ предоставления услуг MSPP (Multi-Service Provisioning Platform) и коммутации MSSP (Multi-Service Switching Platform). Эти платформы являются ключевыми элементами транспортных сетей и представляют предмет изучения в учебном пособии.

Обозначения источников информационной нагрузки на рис. 2.10:

- PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy – плезиохронная цифровая иерархия (иерархические скорости 2.048, 8.448, 34.368 и 139.264 Мбит/с);

- N-ISDN, Narrowband Integrated Services Digital Network – узкополосная цифровая сеть с интеграцией служб (У-ЦСИС);
 - IPX, Internet Packet eXchange – межсетевой обмен пакетами;
 - SANs, Storage Area Networks – сети хранения данных (серверы услуг, базы данных);
 - iSCSI, internet Small Computer System Interface – протокол для установления взаимодействия и управления системами хранения данных, серверами и клиентами;
 - HDTV, High-definition television – цифровое телевидение высокой четкости;
 - ESCON, Enterprise Systems Connection – соединение учрежденческих систем (с базами данных, серверами);
 - FICON, Fiber CONnection – волоконное соединение для передачи данных;
 - PPP, Point-to-Point Protocol – протокол «точка-точка»;
- HDLC, High-level Data Link Control – высокоуровневый протокол управления на уровне звена передачи данных.

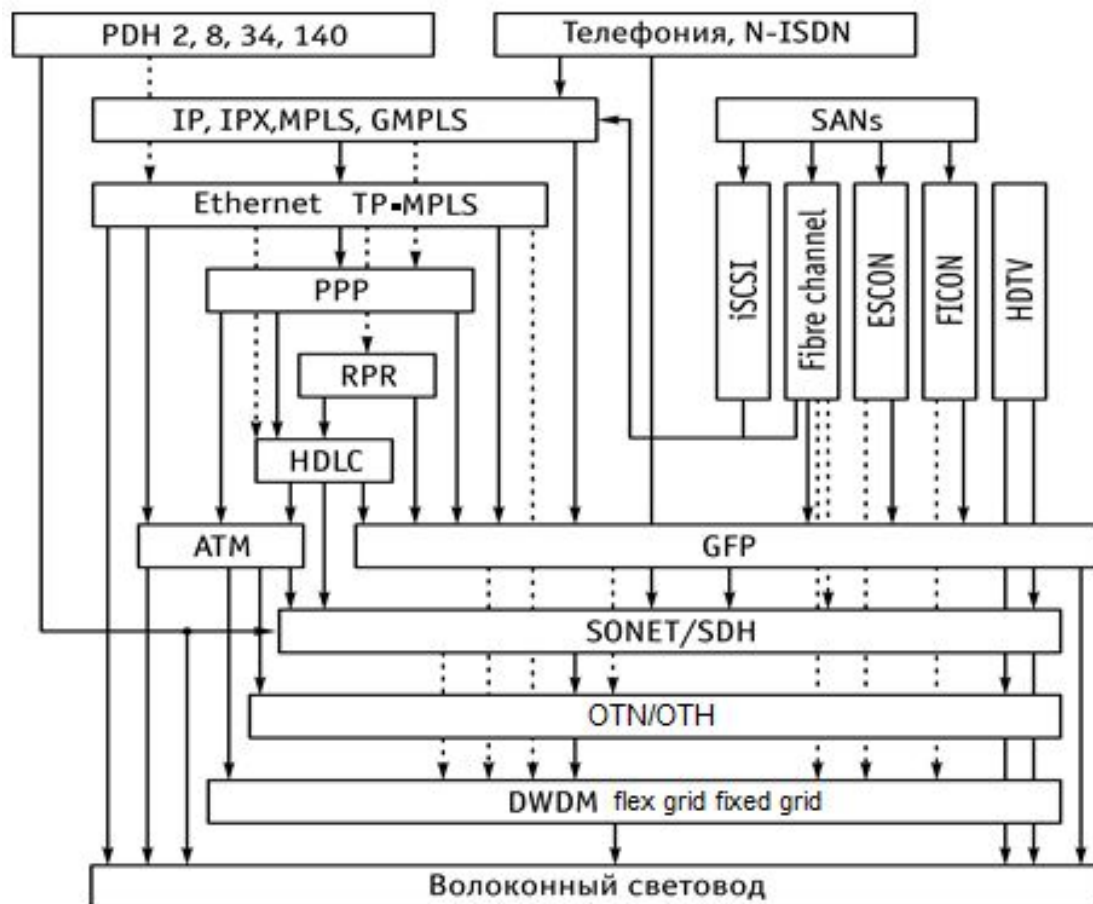


Рис. 2.12. Обобщенная архитектура оптической мультисервисной транспортной платформы

Протоколы PPP, RPR, HDLC, GFP в транспортных сетях выполняют функции согласования информационных данных от источников нагрузки с транспортными структурами с целью повышения эффективности

использования ресурсов этих структур, например, виртуальных контейнеров в сети SDH или оптических каналов в сети OTN, или физических ресурсов кадров передачи сети Ethernet.

Также необходимо отметить, что очень часто в технической литературе модели транспортных сетей сравниваются с семиуровневой моделью взаимодействия открытых систем OSI (Open System Interconnection) для сетей передачи данных, разработанной международной организацией по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Сравнение показывает, что в транспортных сетях реализуются два нижних уровня: физический (обозначается L0, L1, т.е. для волоконных световодов и спектрального мультиплексирования с фиксированной и гибкой сетками оптических волн и поддержкой технологий OTN/OTH, Sonet/SDH) и канальный (обозначается L2, т.е. с поддержкой Ethernet, ATM, GFP т.д.) в модели OSI. В отдельных реализациях транспортных платформ возможна маршрутизация пакетов, что соответствует по модели OSI функциям сетевого уровня (обозначается L3, т.е. IP, IPX, MPLS и др.).

Мультисервисные возможности оптической сети с перспективными технологиями также представлены рис.2.13.

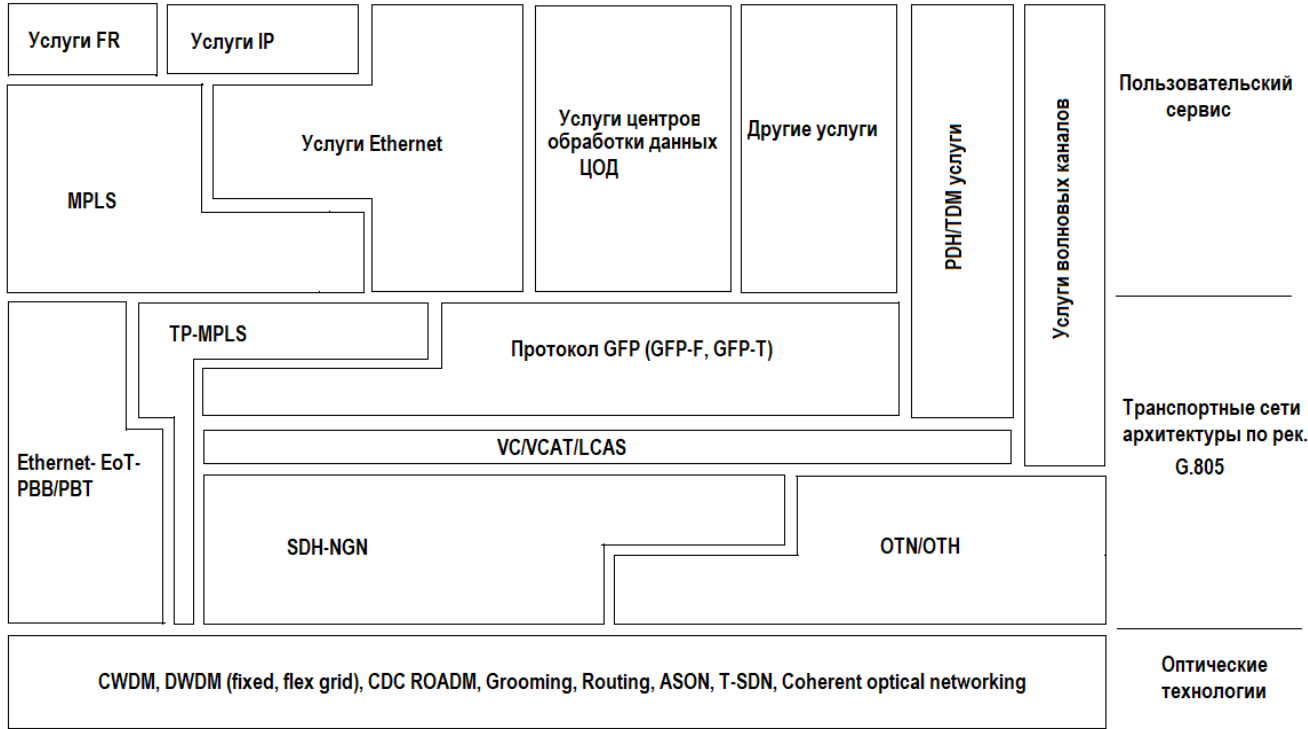


Рис. 2.13. Мультисервисные возможности транспортных сетей

Контрольные вопросы

1. Сколько моделей транспортных сетей предусмотрено стандартами МСЭ-Т?
2. Что общего и различного в моделях транспортных сетей?
3. Сколько и какие уровни имеет модель сети SDH?
4. Какие основные функции присвоены уровню среды передачи в модели сети SDH?
5. Какие функции должны исполнять уровни трактов в модели сети SDH?
6. Какие каналы может поддерживать уровень каналов сети SDH?
7. Сколько и какие уровни имеет модель сети АТМ?
8. Какой из уровней модели сети АТМ обеспечивает коммутацию ячеек АТМ?
9. Чем образуются виртуальные пути и виртуальные каналы в сети АТМ?
10. Какое назначение имеет уровень адаптации в модели сети АТМ?
11. Что может использоваться в качестве среды передачи ячеек АТМ?
12. Сколько и какие уровни имеет модель сети OTN-OTN?
13. Какие функции определены уровню пользователя в модели сети OTN?
14. Какие функции определены уровню оптического канала в модели сети OTN?
15. Почему стандарт локальной компьютерной сети Ethernet стал основой стандарта транспортной сети?
16. Сколько и какие уровни имеет модель сети Ethernet?
17. Какие функции выполняет уровень среды передачи сети Ethernet?
18. Какие функции выполняет уровень формирования кадров сети Ethernet?
19. Что может входить в оптическую мультисервисную транспортную платформу?
20. Какие функции выполняют протоколы IP, MPLS, MPLS-TP в транспортной сети?
21. Что обозначает термин «static grid» и «flex grid» в схеме транспортной платформы?
22. Какие возможности по предоставлению услуг пользователям предоставляют оптические технологии транспортных сетей?

3. Сетевые элементы и структуры оптических транспортных сетей

Сетевым элементом (СЭ) транспортной сети, по определению рекомендации М.3060 МСЭ-Т, принято считать архитектурную концепцию, которая представляет оборудование электросвязи (или группу/часть оборудования электросвязи) и оборудование поддержки или любые другие группы изделий, которые считаются принадлежащими к оборудованию электросвязи, выполняющее не менее одной функции элемента обслуживания (ФЭО) или функции транспортного элемента (ФТЭ).

Сетевые элементы размещаются в оконечных, промежуточных и узловых станциях транспортных сетей. Они находятся в окружении различных вспомогательных устройств (рис.3.1): электропитания, управления, сигнализации и т.д. При этом станции могут быть обслуживаемыми, т.е. с постоянным техническим персоналом, и необслуживаемыми, т.е. присутствие персонала для обслуживания приборов и устройств необязательно. В последнем случае ключевую роль должна играть система управления сетью, которая непрерывно отслеживает все объекты необслуживаемой станции.

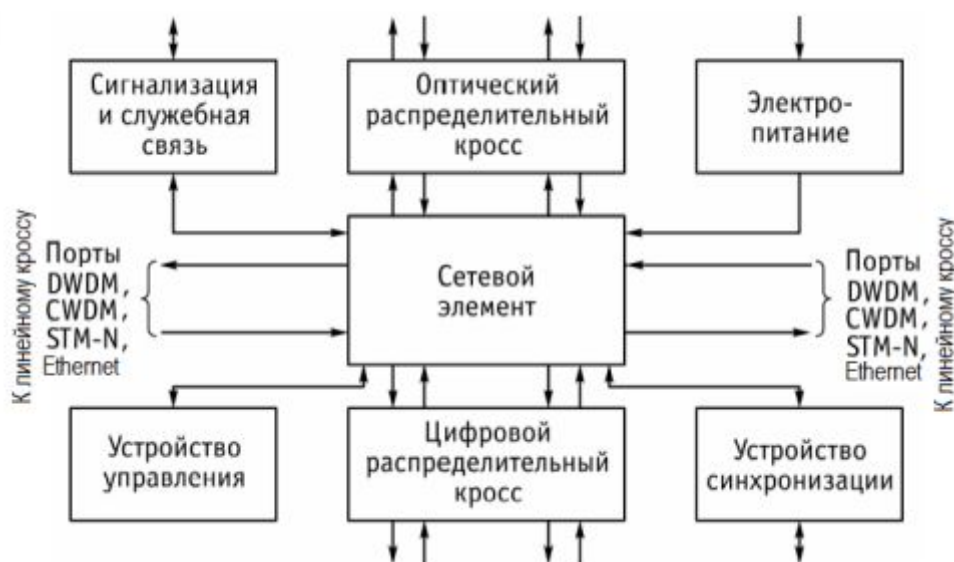


Рис. 3.1. Сетевой элемент и вспомогательное оборудование

Возможная функциональная наполненность сетевого элемента оптической сети (ONE) представлена на рис.3.2.

Сокращения, используемые на рис.3.2: FEC, Forward Error Correction – упреждающая коррекция ошибок; FG CDC, Flex Grid colorless, directionless, and contention-less – гибкая сетка без цвета (назначения волны), без направленности, независимо от нагрузки; ROADM, Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – реконфигурируемый – перестраиваемый оптический мультиплексор выделения ввода; FG WSS, Flex Grid Wavelength Selective Switch – селективный коммутатор волн с гибкой сеткой; BER, Bit Error Rate – частота появления битовых ошибок; AIS, Alarm Indication Signal – сигнал

индикации аварийного состояния; OSNR, Optical Signal Noise Ratio –отношение оптический сигнал/шум.

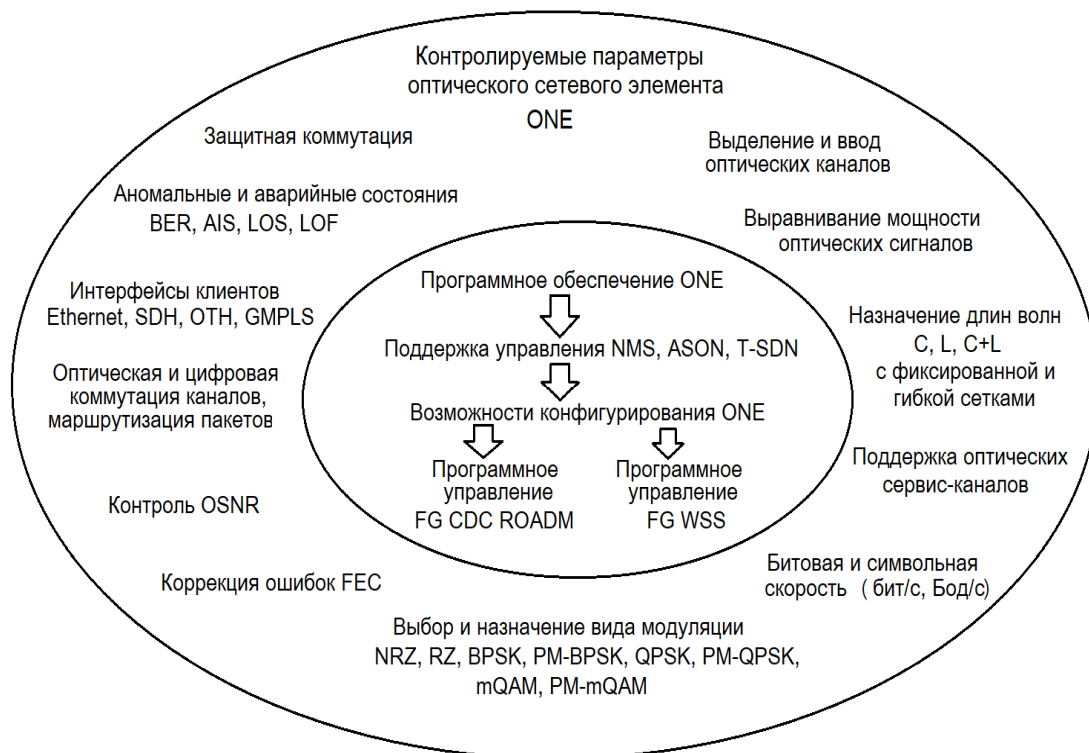


Рис. 3.2. Функциональные возможности сетевого элемента оптической транспортной сети

В этой главе рассматриваются принципы построения аппаратуры транспортных сетей, принципы обозначения функций аппаратуры для составления схем организации связи и примеры структур оптических транспортных сетей.

3.1. Принципы построения аппаратуры транспортных сетей

Построение аппаратуры транспортных сетей соответствует стандартизации МСЭ-T:

- аппаратура SDH строится по рекомендациям G.783 (Characteristics of synchronous digital hierarchy equipment functional blocks – характеристики функциональных блоков оборудования синхронной цифровой иерархии);
- аппаратура ATM строится по рекомендациям I.731 (Types and general characteristics of ATM equipment – типы и общие характеристики оборудования ATM), I.732 (Functional characteristics of ATM equipment- функциональные характеристики оборудования ATM);
- аппаратура OTH строится по рекомендациям G.798 (Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks – характеристики функциональных блоков оборудования оптической транспортной иерархии);

- аппаратура Ethernet строится по рекомендациям G.8021 (Characteristics of Ethernet transport network equipment functional blocks – характеристики функциональных блоков оборудования транспортной сети Ethernet);

- аппаратура TP-MPLS строится по рекомендациям G.8121 (Characteristics of Transport MPLS (TP-MPLS) equipment functional blocks – характеристики функциональных блоков оборудования транспортных сетей TP-MPLS).

На пути к широкому внедрению находятся конкурентные разработки Ciena по Ethernet PBB/PBT (Provider Backbone Bridging - мост магистрали провайдера, Provider Backbone Transport – транспортная магистраль провайдера), которые нацелены на снижение стоимости оборудования по сравнению с MPLS.

Среди аппаратуры транспортных сетей наблюдается расширение номенклатуры оптических изделий и обозначение их в качестве сетевых элементов: отдельных оптических усилителей OA (Optical Amplifier); оптических мультиплексоров ввода-вывода OADM (Optical Add/Drop Multiplex и реконфигурируемых ROADM (Reconfigure OADM); оптических коммутаторов OXC (Optical xCross Connect) или фотонных PXC (Photonic XC); оптических регенераторов 2R и 3R; полностью оптических конверторов волн. Также стало нормативом обозначение в виде сетевого элемента оптической транспортной сети участка передачи WDM с отдельными оптическими усилителями, компенсаторами дисперсии, оптическими мультиплексором и демультиплексором. Такие участки принято обозначать «Линейный сегмент» [95].

Аппаратура может быть представлена в нескольких вариантах упаковки: универсальные кассеты или полки; компактные или мини кассеты для «мини-мультиплексора»; одноплатное (без корпуса) исполнение «микро-мультиплексора».

Аппаратура SDH/OTN часто оформляется в виде универсальной кассеты (полки, корзины, подстатива или поддона, рис.3.3), в которую вставляются отдельные сменные и фиксированные блоки (модули, платы или слоты) с определённым набором функций (интерфейсных, коммутационных, электропитания, управления и т.д.). В этом исполнении мультиплексор SDH, как правило, имеет наиболее широкий набор функций сетевого элемента, т.е. он может быть оконечным, промежуточным (ввода/вывода) и узловым (кроссовым коммутатором) сетевым элементом с любыми наборами интерфейсов, коммутаторов трактов высокого и низкого порядков, функциями защиты, синхронизации и управления (табл.3.3).



Рис. 3.3. Полка универсального мультиплексора SDH U-NODE WBM

Отдельные платы и контактные элементы для внешних подключений в универсальной полке (кассете) соединяются через системную шину (рис.3.4).

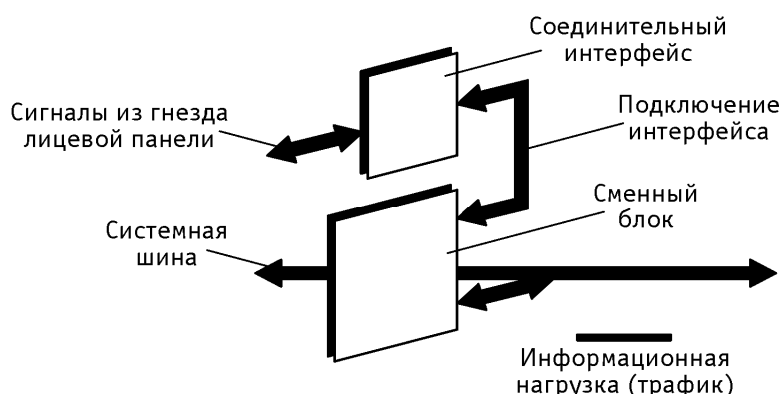


Рис. 3.4. Принцип соединения в универсальной полке оборудования

Ещё большей универсальности сетевые элементы могут достигнуть при использовании в составе оборудования полок расширения, благодаря которым можно получить требуемые интерфейсные окончания (например, большое количество интерфейсов для цифровых потоков E1, E3, GEth, 10GEth).

Для этой реализации в полках расширения вместо кроссовых коммутаторов устанавливают сменные блоки соединительных интерфейсов, которые соединяют через короткие электрические или оптические шнуры с интерфейсами основной (главной) полки. При этом полку расширения и основную полку крепят, как правило, на общей стойке.

Компактные (мини) мультиплексоры имеют ограниченный набор функций, отсутствие отдельных заменяемых блоков или их минимум (1-4 платы) (рис.3.5).

Таблица 3.1. Общие характеристики мультиплексора U-NODE WBM

Главная полка (универсальная)	Интерфейс	Каналов на блок	Виды резервирования				
			4-х волоконное MSP Ring	2-х волоконное MSP Ring	SN CP	Линейное MSP	Блоков
Поддержка линейного интерфейса и режима резервирования	STM-64 оптический	1		+	+		1+1, 1:1
	STM-16 оптический	1	+	+	+	+	1+1, 1:1
	STM-4 оптический	От 1 до 4			+	+	1+1, 1:1
	STM-1 оптический	От 1 до 16			+	+	1+1, 1:1
	STM-1 электрический	4/8/16			+		1:1
	GEth	2/4					
	Fast Eth	6					
	34 M	6					1:1
	2M	63					1:N
Уровень кроссовой коммутации	Сцепка виртуальных контейнеров VC-4-4с, VC-4-16с, VC-4-Xv, VC-12-Xv Коммутация 256×256 VC-4, 2016×2016 VC-12						



Рис. 3.5. Конструкция «мини» мультиплексора SpectralWave C-Node

Таблица 3.2. Общие характеристики мультиплексора SpectralWave C-Node

Полка типа «мини»	Интерфейс	Каналов на блок	Виды резервирования		
			SNCP	Линейное MSP	Блоков
Поддержка линейного интерфейса и режима резервирова ния	STM-4	1-2	+	-	-
	STM-1	1-2	+	+	-
	34 М	3			-
	2М	8-32			-
	10BASE-T	8			-
	100BASE-T	4			-
Уровень кроссовой коммутации	Сцепка виртуальных контейнеров VC-12-Xv (X=1...16), (X=1...21) Коммутация 16×16 VC-4, 1008×1008 VC-12				

Если сравнить данных таблиц 3.1 и 3.2, то можно увидеть, что конструктивное исполнение аппаратуры существенно влияет на набор исполняемых функций, в частности, на емкости интерфейсов, защиту линии и соединений и т.д.

Аналогично устроено оборудование других транспортных технологий.

Оборудование АТМ подразделено [19]:

- концентраторы нагрузки, в которые подключают пользовательские устройства (локальные сети Ethernet, персональные компьютеры с интерфейсами АТМ, серверы услуг и т.д.);
- коммутаторы рабочих групп, которые объединяют концентраторы, локальные сети АТМ, серверы услуг и т.д.;
- магистральные коммутаторы, которые и образуют транспортную сеть с большим числом виртуальных соединений (виртуальных путей и виртуальных каналов).

Например, мультисервисный концентратор Alcatel 7270 MSC (Multiservice Concentrator) представляет собой пограничный коммутатор операторского класса, предназначенный для адаптации, агрегации и предоставления услуг в мультисервисных сетях АТМ/IP/MPLS. Современные функции управления передачей трафика на основе единой стандартной платформы обеспечивают предоставление приносящих прибыль дифференцированных услуг для приложений IP/MPLS, видео, АТМ, Frame Relay и выделенных линий. Помимо предоставления услуг, полностью управляемый концентратор Alcatel 7270 MSC позволяет операторам оптимизировать сетевую инфраструктуру за счет широкополосной агрегации трафика мобильных сетей 2G/2,5G/3G, трафика фиксированных беспроводных сетей и трафика цифровых абонентских линий DSL. Выпускаются две модели Alcatel 7270 MSC, 6-слотовая модель для установки в помещениях заказчика и 8-слотовая - для операторов. В обеих моделях используются одинаковые управляющие, коммутационные и

интерфейсные карты, полностью избыточная, неблокируемая коммутационная матрица. Пропускная способность коммутатора – 800 Мбит/с.

Другой пример оборудования ATM, маршрутизирующий коммутатор Alcatel 7670 RSP (Routing Switch Platform) – это система, представляющая собой основу мультисервисных, многопротокольных сетей. Коммутатор Alcatel 7670 RSP отличается высокой масштабируемостью (от 2,4 Гбит/с - на границе сети до 450 Гбит/с - в магистрали многопротокольной сети). Alcatel 7670 RSP поддерживает уникальный набор функций, технологий доступа и протоколов, что позволяет предложить пользователям самые разнообразные услуги. Эта платформа, в частности, поддерживает виртуальные частные сети (VPN) на основе протокола IP, технологии 10/100 Ethernet и Gigabit Ethernet, взаимодействие сетей Frame Relay и Ethernet, многопротокольную коммутацию по меткам (MPLS), передачу пакетов через SDH (Packet over SDH, POS), а также технологии Frame Relay, ATM, SHDSL и TDM. Поддерживает одновременно 768000 соединений. Это соединения PVC и SVC «точка - точка» и «точка - много точек»; соединения S-PVC «точка - точка»; специальные соединения для тестирования.

Другие примеры построения оборудования SDH, ATM, OTN, Ethernet, TP-MPLS можно найти на сайтах производителей: T8, СУПЕРТЕЛ, Huawei, Alcatel-Lucent-Siemens-Nokia, NEC, Cisco, Marconi, Ciena и т.д.

Следует обратить внимание на *платформенный принцип* построения аппаратуры транспортных сетей. Платформы имеют различное конструктивное исполнение (рис.3.6) и различную функциональную наполняемость.

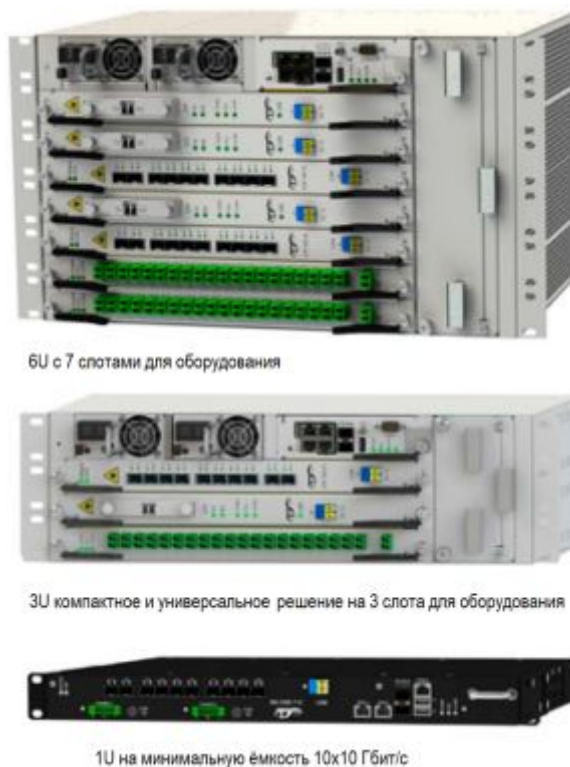


Рис. 3.6. Примеры конструкций мультисервисных платформ ВОЛГА Т8 в трёх вариантах исполнения

Мультисервисные транспортные платформы имеют несколько вариантов обозначений и различные наборы функций и интерфейсов:

- MSPP, Multi Service Provisioning Platform – мультисервисная объединенная платформа – первая версия транспортных платформ, в которых были объединены возможности сетей SDH и сетей пакетной передачи пользовательского трафика IP, Ethernet (1999 год);

- MSTP, Multi Service Transport Platform – мультисервисная транспортная платформа – представляет собой интеллектуальную платформу для услуг с одной стороны и эффективное использование волоконно-оптической среды за счет режима DWDM и CWDM (2001 год);

- MSSP, Multi Service Switching Platform – мультисервисная коммутационная платформа – обеспечивает услуги гибкой коммутации соединений в узлах сети, защитные переключения на любом уровне (секций, трактов, волновых каналов, пользовательского трафика); также возможен вариант обозначения TSS (Transport Service Switch – транспортный сервисный коммутатор, например 1850TSS) или CETP (Carrier Ethernet Transport Platform – транспортная платформа Ethernet с оптическими интерфейсами) [98];

- платформы типа LH (Long Haul) или ELH (Extended Long Haul) в одной системе интегрируются с другими платформами (MSTP, MSSP) и предназначены для протяженных линий транспортных сетей с большим числом оптических каналов (40 – 320 и более, например 1830PSS фотонный коммутатор), Cienas 6500 Packet-Optical Platform [100] с производительностью 96 Тбит/с;

- оптические платформы с генерирующими транспондерами, оптическими мультиплексорами ввода/вывода OADM (Optical Add/Drop Multiplex) и реконфигурируемыми оптическими мультиплексорами ввода/вывода ROADM (Reconfigure OADM) с применением сеток волн CWDM и DWDM.

В обозначениях транспортных платформ возможны разнообразные сочетания сокращений: FSP (Fiber Service Platform) компании ADVA; MSP (Multiservice Platform) и TSS (Transport Service Switch) компании Alcatel; MOSS (Managed Optical Services Switch) компании Ciena; уже ранее показанные MSTP, MSSP, MSPP компании Cisco; OMS (Optical Multiservice) и MHL (Multi Haul Long) компании Marconi; OSM (Optical Services Multiplexer) и OSP (Optical Switching Platform) компании Meriton; OMP (Optical Metro Platform), OME (Optical Multiservice Edge) и VSP (Virtual Service Platform) компании NORTEL; OTS (Optical Transport System) компании Tellabs, MS-OTN от HUAWEI и т.д.

Детальную информацию по каждому компоненту (изделию) мультисервисной платформы каждого известного производителя невозможно сосредоточить в ограниченном объеме учебного пособия. Поэтому рекомендуется при выполнении проекта обращаться на сайты производителей аппаратуры для запроса необходимой информации по возможностям и комплектации полок платформ и их расширений в части интерфейсов пользователей, линейных интерфейсов, коммутации и т.д.

Перспективное решение для организации сетевого элемента с суперканалами на скорости от 100 Гбит/с до 1Тбит/с представлено на рис.3.7. Такие возможности уже частично заложены в оптическую транспортную платформу OSN8800 и OSN9800 HUAWEI.

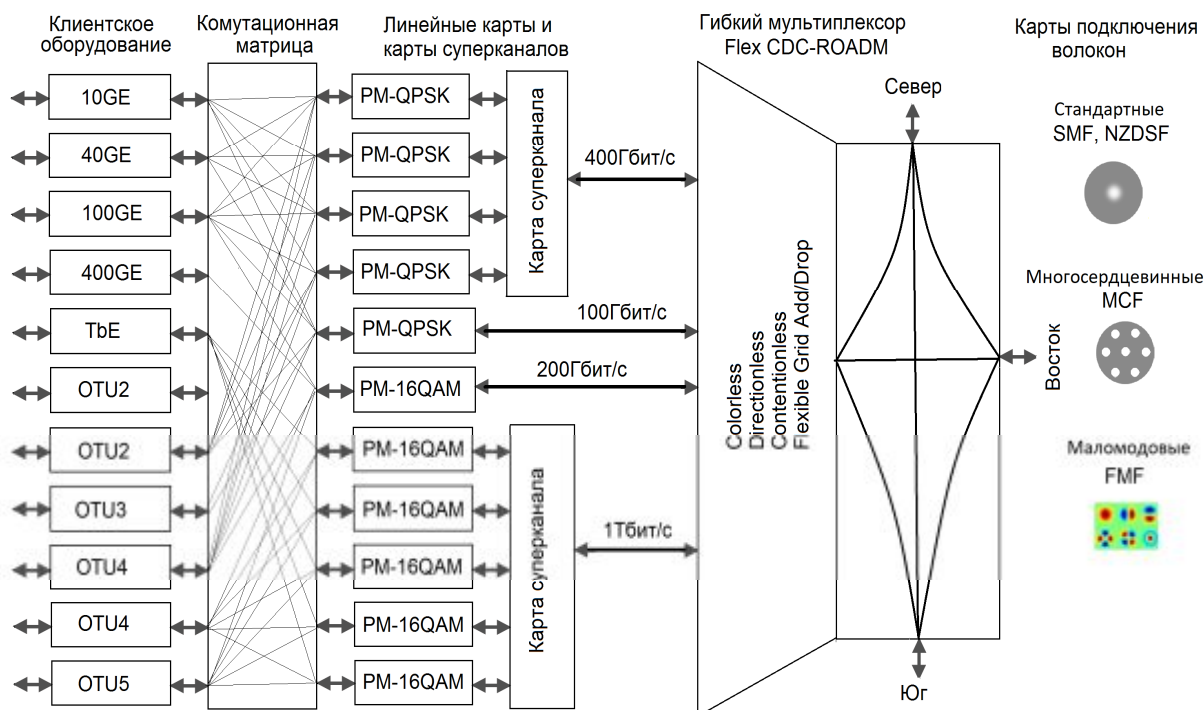


Рис. 3.7. Пример общей структуры сетевого элемента оптической транспортной сети с организацией суперканалов

3.2. Система обозначений сетевых элементов транспортных сетей

Принципы обозначения сетевых элементов транспортных сетей изначально были определены в ГОСТ 2.761-84 и 21.406-88. Эти обозначения касались волоконных световодов, разъёмов, модулей передачи и приёма, оборудования PDH и SDH, но не определяли правила обозначения оптического оборудования мультиплексоров оконечных, ввода-вывода, кроссовой коммутации и т.д. По этой причине для обозначений новых типов сетевых элементов в учебном пособии предлагается использовать широко распространённую символику производителей этой техники и некоторые обозначения из [2, 5, 21].

В структурах сетевых элементов, обозначаемых на схемах организации связи, различают поля обозначения функций: интерфейсов пользователей (клиентов транспортной сети); интерфейсов линейных или агрегатных; выделения и ввода; кроссовой коммутации; мультиплексирования и демультиплексирования WDM и т.д. Ниже приведен ряд обозначений.

Общее обозначение промежуточного сетевого элемента приведено на рис. 3.5а.

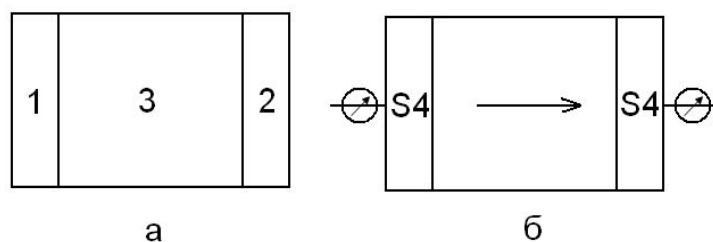


Рис. 3.5. Обозначения промежуточного сетевого элемента

Такое обозначение имеют регенераторы линейных сигналов (рис. 3.5б), где 1 и 2 поля обозначения типа и уровня линейных интерфейсов (в примере STM-4), 3 обозначение регенератора.

На рис. 3.6а представлена общая структура обозначения терминального сетевого элемента (концентратора пользовательского трафика, мультиплексора с функциями кроссовой коммутации пользовательских интерфейсов).

Такое обозначение могут иметь различные терминальные мультиплексоры. В поле 1 обозначаются пользовательские интерфейсы, например (б), E1. В поле 2 может обозначаться функция кроссовой коммутации или концентрации нагрузки, например, знаком # указывается на наличие кроссовой коммутации, кроме того, могут использоваться буквенно-цифровые индексы обозначения кроссовой коммутации (TU-12, VC-12, AU-4, VC-4 и т.д.). В поле 3 обозначается агрегатный интерфейс (S16 – STM-16), в том числе, интерфейс с вариантом линейной защиты (1+1 или 1:1).

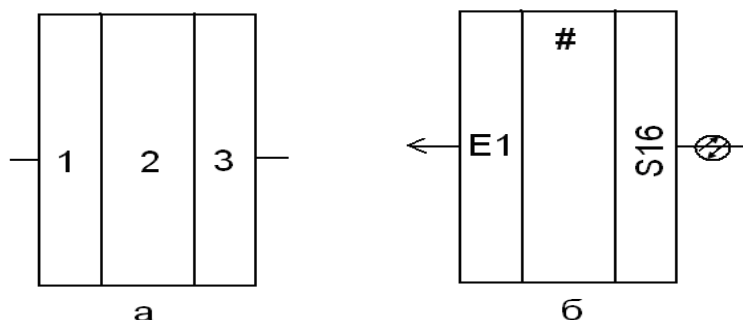


Рис. 3.6. Обозначение терминального сетевого элемента

На рис. 3.7а представлена общая структура обозначения сетевого элемента с функциями «Ввод/вывод» для пользовательских каналов.

Агрегатные интерфейсы обозначаются в полях 1,2. При этом их принято разделять на западные и восточные. В поле 4 указывается функция ввода-вывода и уровень обработки сигналов (например для СЭ SDH : #, AU-4, TU-12, VC-4, VC-12 и т.д.). В поле 3 обозначаются пользовательские интерфейсы, например, E1(б).

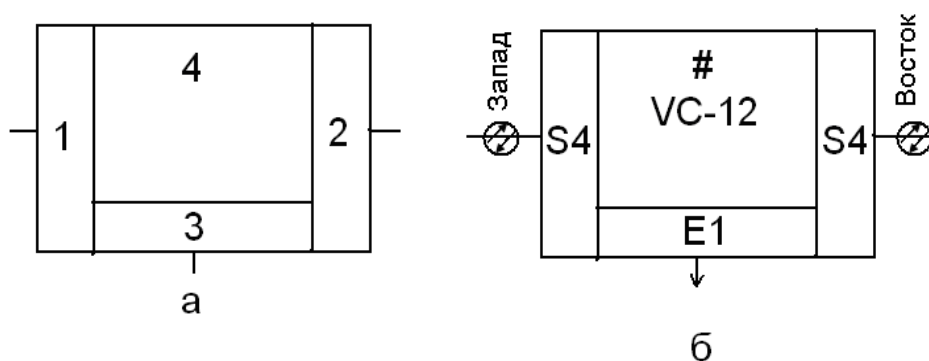


Рис. 3.7. Обозначение промежуточного сетевого элемента с доступом к каналам пользователей

На рис. 3.8а представлена общая структура обозначения сетевого элемента с функциями кроссовой коммутации.

В этой структуре поля 1-4 могут использоваться для обозначений агрегатных интерфейсов, поле 5 содержит значки и цифробуквенные индексы кроссируемых сигналов (VC-12, VC-4, VC-12-Xv, ODU1, ODU2, ODU3 и т.д.). Кроме того, если в узловом сетевом элементе предусмотрены возможности доступа к пользовательским каналам, тогда в полях (1-4) указываются соответствующие интерфейсы (рис. 3.8б для СЭ SDH), (рис.3.8в для СЭ OTN).

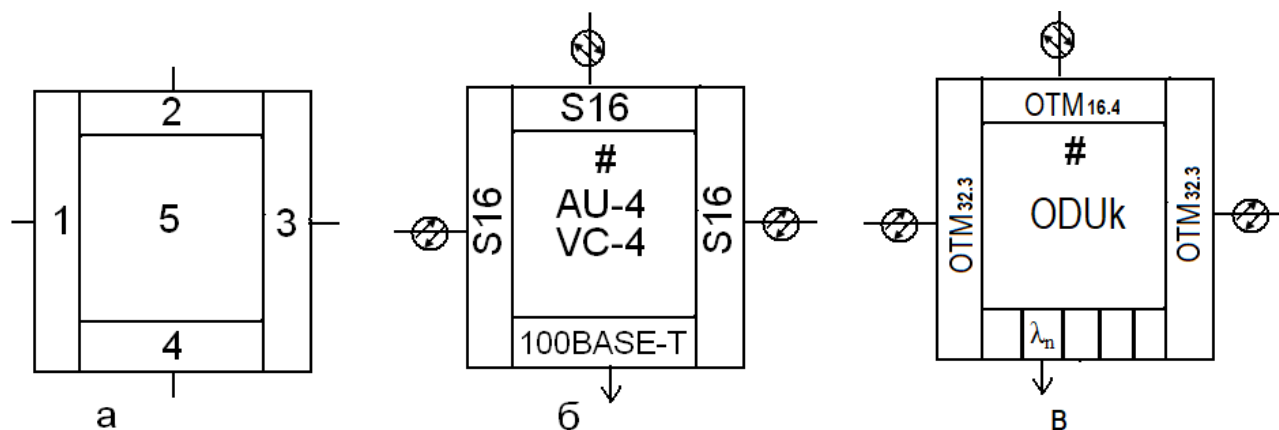


Рис. 3.8. Обозначение узлового сетевого элемента

На всех рисунках к полям пользовательских и агрегатных интерфейсов присоединяются линии электрических или оптических окончаний. Оптические линии обозначаются окружностью со стрелочкой (двумя стрелочками), пересекаемой сплошной линией. Одна стрелочка указывает на линию с односторонней передачей (одно волокно). Две стрелочки, повернутые встречно, указывают на двухстороннюю передачу по разным волокнам. Электрические линии обозначаются сплошной чертой.

Обозначения некоторых наиболее распространенных сетевых элементов приведены на рисунках 3.9-3.11.

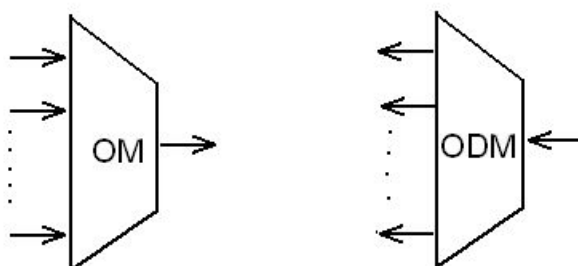


Рис. 3.9. Обозначения оптических мультиплексора (OM, Optical Multiplex) и демультиплексора (ODM, Optical De-Multiplex)

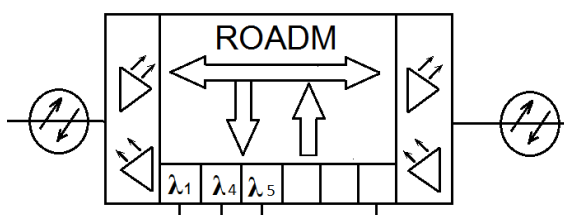


Рис. 3.10. Обозначение оптического реконфигурируемого мультиплексора «Ввода/Вывода» (ROADM), совмещённого с оптическими усилителями

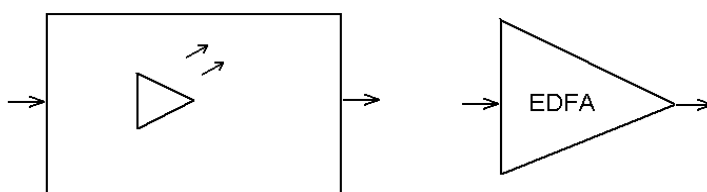


Рис. 3.11. Обозначения оптических усилителей (OA, Optical Amplifier)

Внутренняя структура типового сетевого элемента оптической сети ROADM представлена на рис.3.12, куда входят оптические усилители OA, компенсаторы дисперсии DCF, волновые блокираторы WB, мультиплексоры/демультиплексоры на волноводных решетках AWG, матрицы фотонных кроссовых коммутаторов PXC, транспондерные блоки TPD, оборудование поддержки канала служебной связи OSCR на волнах 1630 нм или 1510 нм и оборудование управления и мониторинга SCRM, OCM.

Необходимо отметить, что в обозначениях коммутаторов ATM, Ethernet могут использоваться значки аналогичные OXC или PXC.

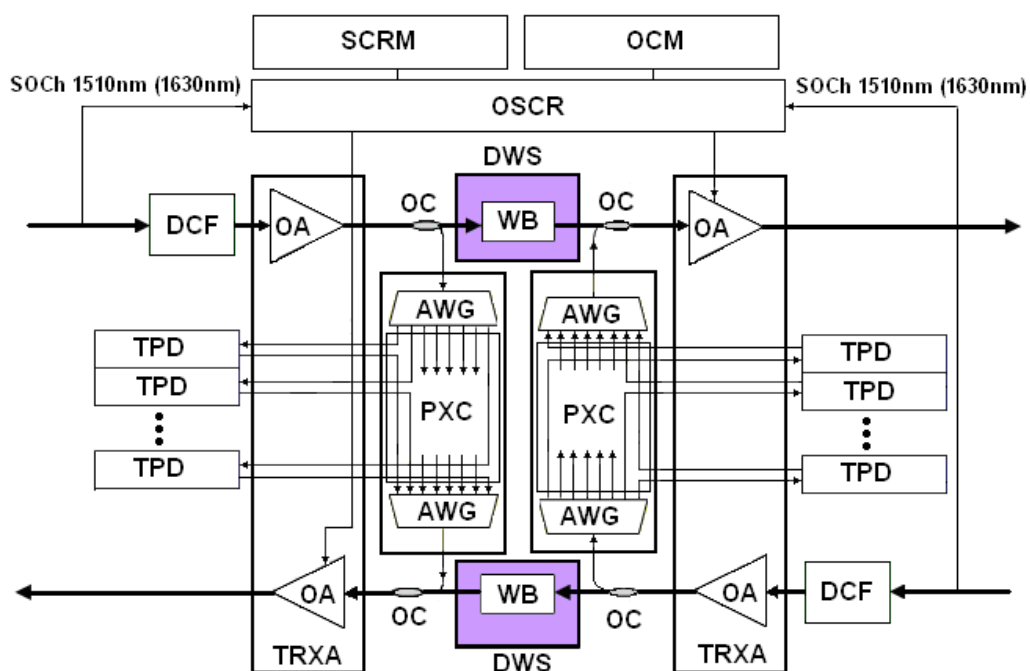


Рис. 3.12. Пример структуры ROADM DW4200 NEC-EZAN
(www.ezan.ac.ru/userfiles/file/CatalogTeleEZAN.pdf)

3.3. Структуры оптических транспортных сетей

Структуры (или архитектуры) транспортных сетей независимо от технологий мультиплексирования и передачи принято представлять:

- линейные соединения «точка-точка» и «линейная цепь»;
- «звездообразные», оснащаемые концентрирующими сетевыми элементами и подключаемыми к ним терминалами;
- кольцевые соединения 2-х и 4-х волоконные кольца;
- смешанные линейно-кольцевые схемы;
- ячеистые, представленные полностью связной схемой узлов кроссовой коммутации (каждый с каждым). Ниже представлены указанные разновидности топологий транспортных сетей.

Структура «точка-точка» соединяет два сетевых элемента, образованных терминальными мультиплексорами. Если это соединение протяженное, то оно может включать промежуточные регенераторы (рис. 3.13). Основной и резервный агрегатные выходы формируют систему защиты типа 1+1 или 1:1 (в этом случае в резервной линии возможен пропуск дополнительной нагрузки). При отказе основного физического соединения сеть автоматически за время не более 50 мс переходит на резервное физическое соединение. Топология широко используется на магистральных сетях со скоростями 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с и в режимах CWDM, DWDM (рис.3.14). При этом защитные функции могут реализоваться как мультиплексорами OM (Optical Multiplex) так и средствами мультиплексоров SDH.

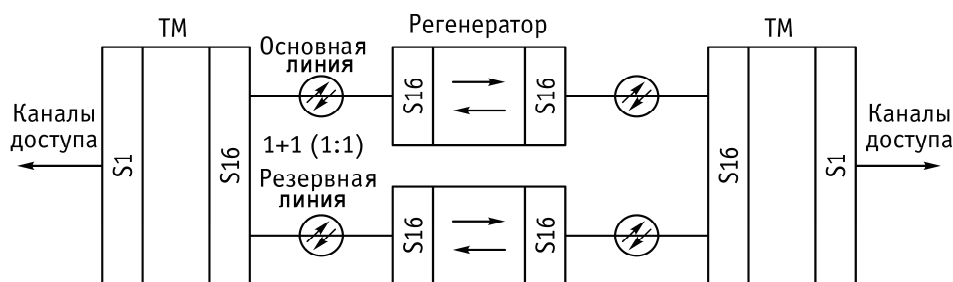


Рис. 3.13. Соединение «точка-точка»

В структуре с оптическими мультиплексорами может применяться промежуточное усиление и коррекция оптических многоволновых сигналов. Для этого устанавливают оптические усилители, которые заменяют $2n$ ($n=2\dots32$ и более) регенераторов. Преимущество этого решения состоит в возможности наращивания емкости транспортной сети постепенно по мере необходимости введением новых волновых каналов без изменения промежуточных усилителей и сохранением гарантированной защиты в секции оптического мультиплексирования между ОМ.

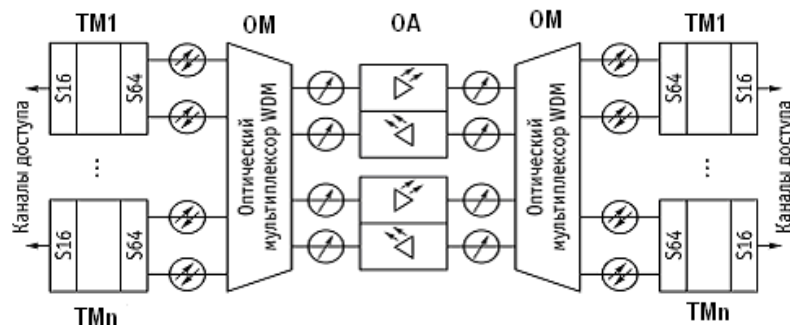


Рис. 3.14. Структура «точка-точка» с числом волновых каналов n

Структура «Линейная цепь» соединяет терминальные сетевые элементы и промежуточные сетевые элементы с каналами доступа (рис. 3.15).

«Линейная цепь» применяется при ограниченной дальности передачи и мало напряженном трафике, например, в технологической транспортной сети. При этом формируется частый доступ к каналам в промежуточных мультиплексорах вывода/ввода ADM. Схема не имеет линейной защиты и отличается простотой построения и относительно низкой стоимостью в реализации.

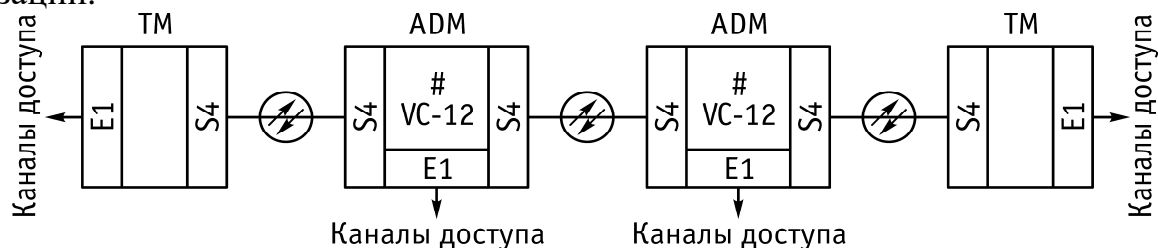


Рис. 3.15. Структура «Линейная цепь»

При необходимости введения линейной защиты в структуре «Линейная цепь» вводится резервная линия между терминальными мультиплексорами ТМ и в этом случае топология преобразуется в плоское кольцо (рис. 3.16).

Для повышения эффективности использования «Линейной цепи» возможно применение режима передачи с WDM и оборудования OADM (рис.3.17).

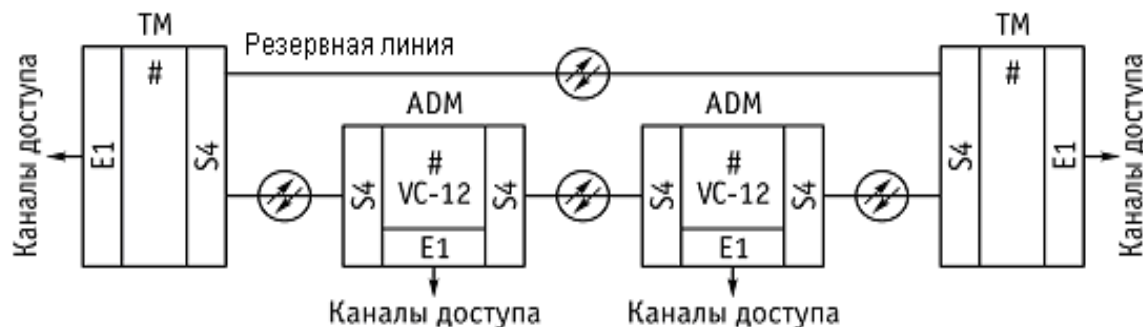


Рис. 3.16. Структура «Плоское кольцо»

В структуре «*Оптическая линейная цепь*» промежуточные оптические мультиплексоры выполняют на основе оптических фильтров, т.е. пассивных устройств, настроенных на фиксированные волны для их выделения и ввода. При этом число волн выделения и ввода ограничено (2, 4, 8). В приведенном примере мультиплексоры SDH в составе сетевых элементов выполняют функции терминирования. Однако возможно реализовать и функции вывода/ввода ADM (рис.3.18).

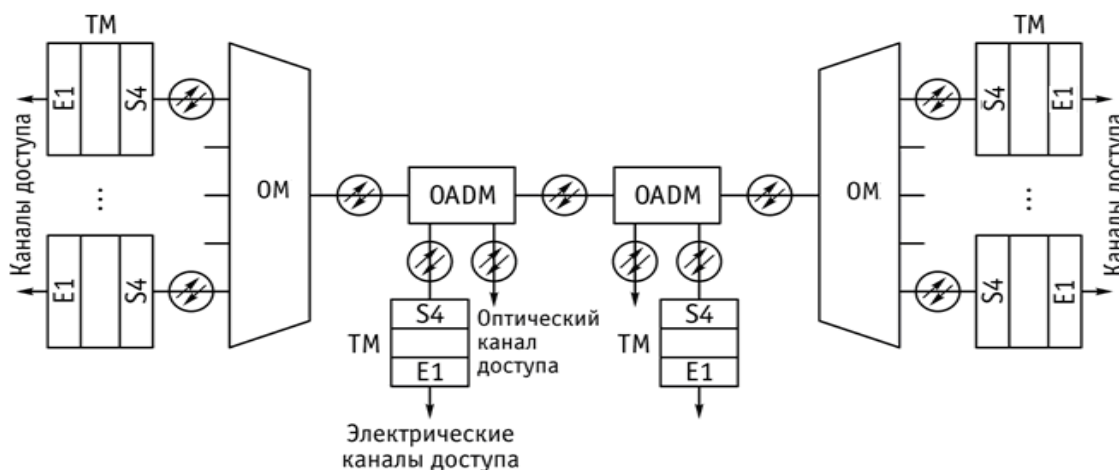


Рис. 3.17. Структура «Оптическая линейная цепь»

Платформенный принцип построения сетевых элементов транспортной сети позволяет реализовать структуру типа «звезда». В этом случае терминалы сети позволяют концентрировать трафик для ввода в магистральную сеть (рис.3.19).

Структура «Звезда» также может быть выполнена в оптической сети с WDM. При этом мультиплексоры SDH оснащают «цветными» агрегатными интерфейсами (рис.3.20).

В структуре «Кольцо» все сетевые элементы одинаковые в агрегатной части и объединены в непрерывную замкнутую физическую сеть. Различают две топологии в этой структуре: 2-х волоконное кольцо (рис.3.21); 4-х волоконное кольцо (рис. 3.22).

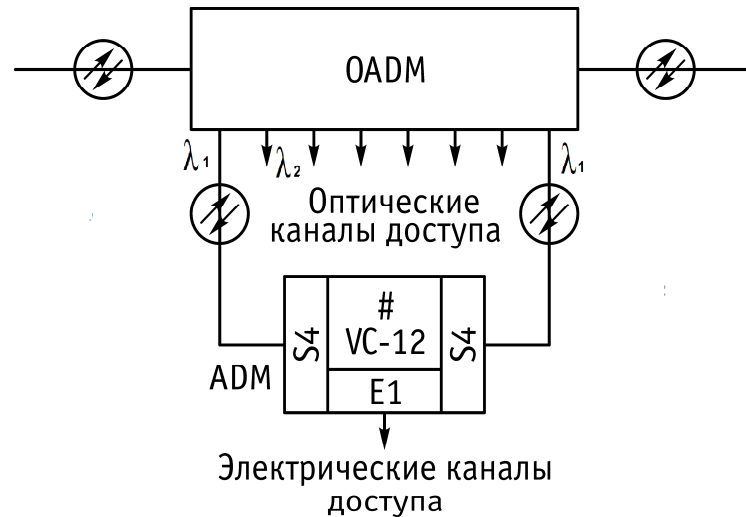


Рис. 3.18. Промежуточный сетевой элемент оптической сети с доступом к оптическим и электрическим каналам на отдельной волне

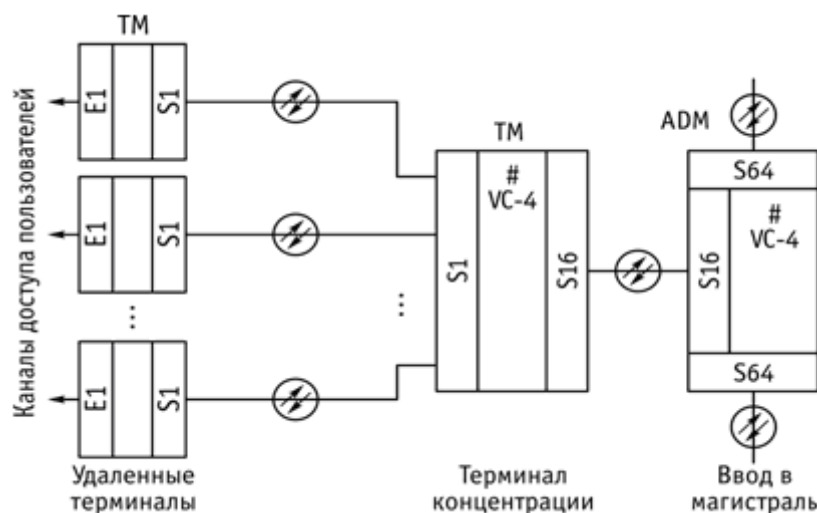


Рис. 3.19. Структура «Звезда»

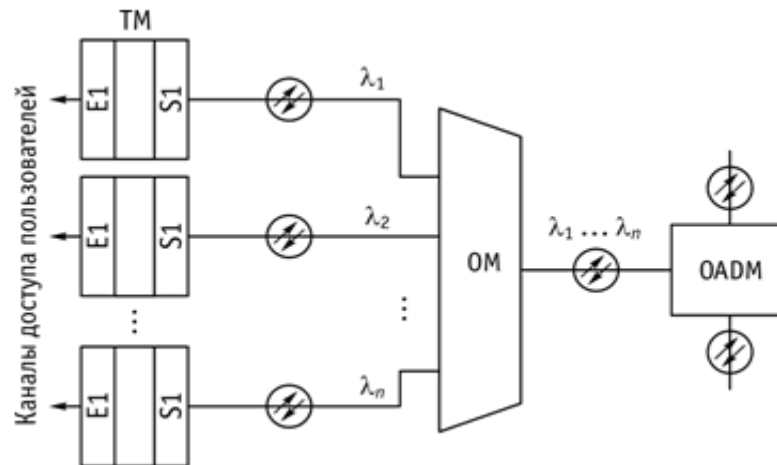


Рис. 3.20. Структура «Звезда» в оптической сети

Структура «Кольцо» отличается высокой «живучестью», реализуемой через развитые схемы защиты. Физическая защита участка передачи между парой соседних мультиплексоров гарантирована в топологии «4-х волоконное кольцо» благодаря использованию двух отдельных кабельных линий и независимых агрегатных портов, количество которых составляет 4 в каждом мультиплексоре. В топологии «2-х волоконное кольцо» защита реализуется за счет использования внутренней емкости передачи в кольце, т.е. емкости STM-N.

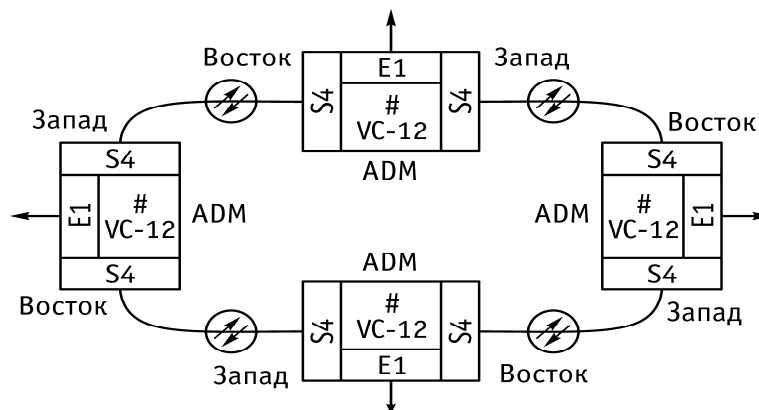


Рис. 3.21. Структура «2-х волоконное кольцо»

Более эффективное, с точки зрения на возможности волокна, использование ресурсов структуры «Кольцо» возможно в оптической сети с применением WDM (рис.3.23, 3.24).

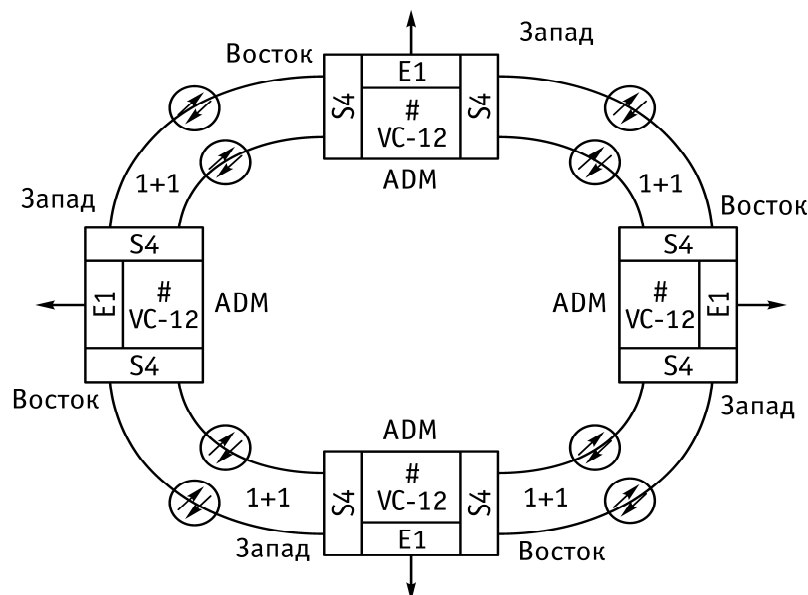


Рис. 3.22. Структура «4-х волоконное кольцо»

На рис. 3.23 представлен пример соединения секций мультиплексирования WDM типа «точка-точка» в кольцевую топологию через мультиплексоры SDH. При этом все защитные функции возложены на мультиплексоры SDH. Режим передачи WDM обеспечивает только эффективное использование ресурсов стекловолокна. Эта структура отличается большой избыточностью электрического и оптического оборудования (оптических интерфейсов, транспондеров в ОМ), сложностью построения систем управления, ограниченной масштабируемостью. От этого ряда проблем существенно избавлена топология оптического кольца с мультиплексорами ROADM. В этой топологии средствами ROADM обеспечиваются живучесть, гибкость, масштабируемость и экономичность сети за счёт использования мукспондерных блоков для объединения нагрузки в одном оптическом канале по направлениям (пример, А-С) и использования транспондеров для высокоскоростной нагрузки (примеры, А-С, А-Д, А-В) (рис.3.24).

Кольцевые транспортные сети применяются на городских и внутризональных сетях. На магистральных сетях выстраивается **структура «Ячейка»**. В этой структуре крупные сетевые узлы соединяются защищенными магистральями топологии «точка-точка». При этом узлы связаны по принципу каждый с каждым (рис.3.25). Примеры обозначений оптических коммутаторов приведены в приложении 7.

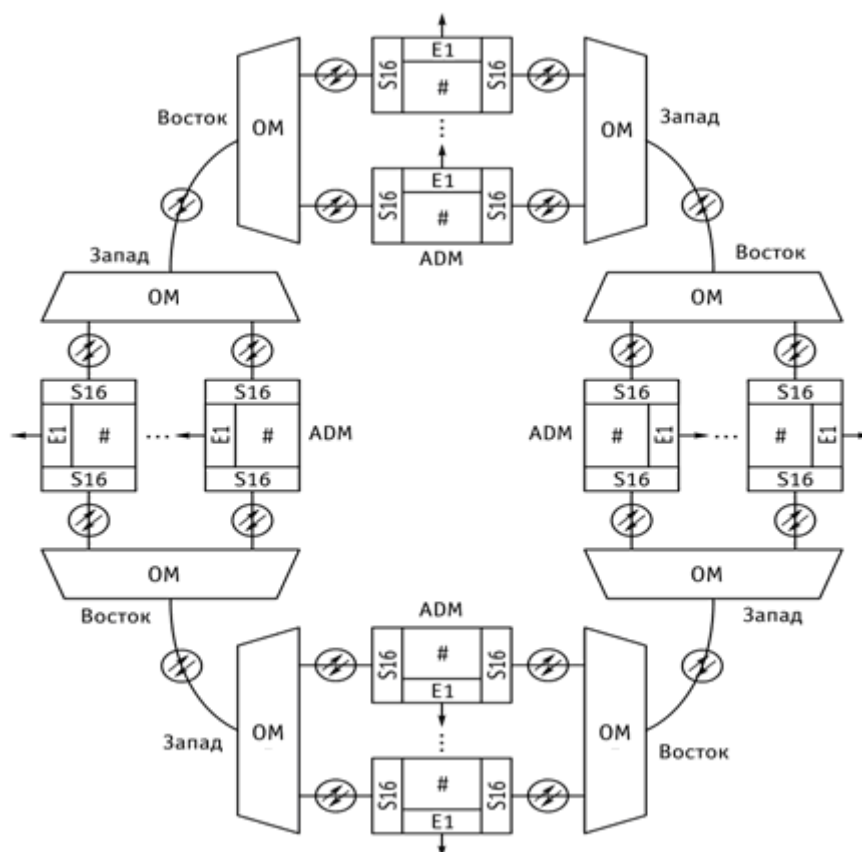


Рис. 3.23. Структура «Оптическое кольцо»

На рис. 3.25 представлен пример 2-х ячеистой структуры транспортной сети. Узлы этой сети могут быть синхронными цифровыми кроссовыми коммутаторами (SDXC) или оптическими кроссовыми коммутаторами (OXC, PXC).

Необходимо отметить, что кольцевые структуры поддерживаются и технологиями ATM и EoT. Сеть Ethernet может поддерживаться через протокол RPR, через сеть SDH, через оптическую сеть WDM, через собственную протокольную организацию STP (Spanning Tree Protocol).

Учитывая общую тенденцию развития оптических сетей и, прежде всего, транспортных сетей в направлении использования только оптических компонентов можно ожидать широкое использование схем линейных трактов без промежуточных станций, но с активной накачкой оптических усилителей эрбиевого типа (EDFA) и рамановского типа (RDFA) (рис.3.26), что может понизить расходы на обслуживание отдельных промежуточных станций или исключить их. В таких структурах возможно использование оптических волновых конверторов, что при ограниченном числе оптических волн в каждом линейном сегменте позволяет гибко выстраивать маршрут оптического соединения (оптический канал OCh, Ch) [95, 98].

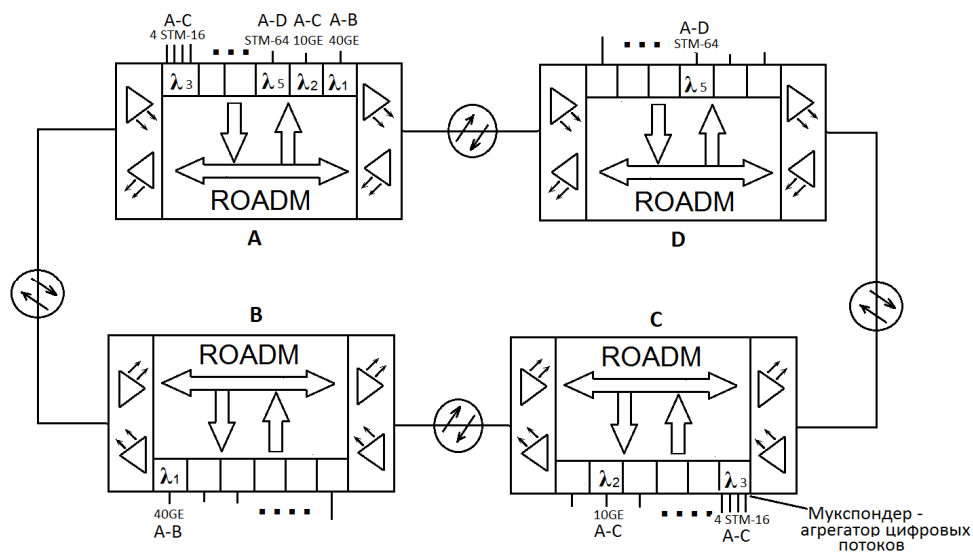


Рис. 3.24. Структура «Оптическое кольцо» с ROADM в 2-х волоконном варианте с оптической ретрансляцией сигналов и примерами соединений

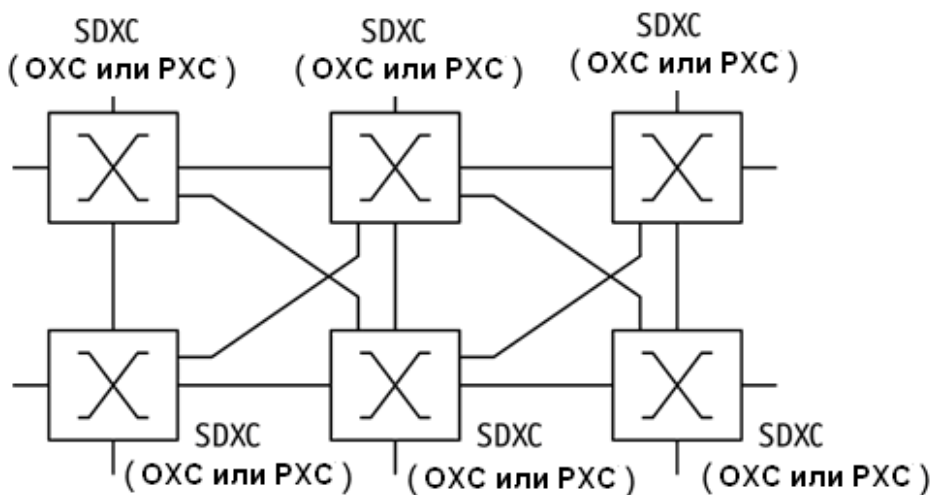


Рис. 3.25. Пример структуры ячеек цифровой или оптической транспортной сети

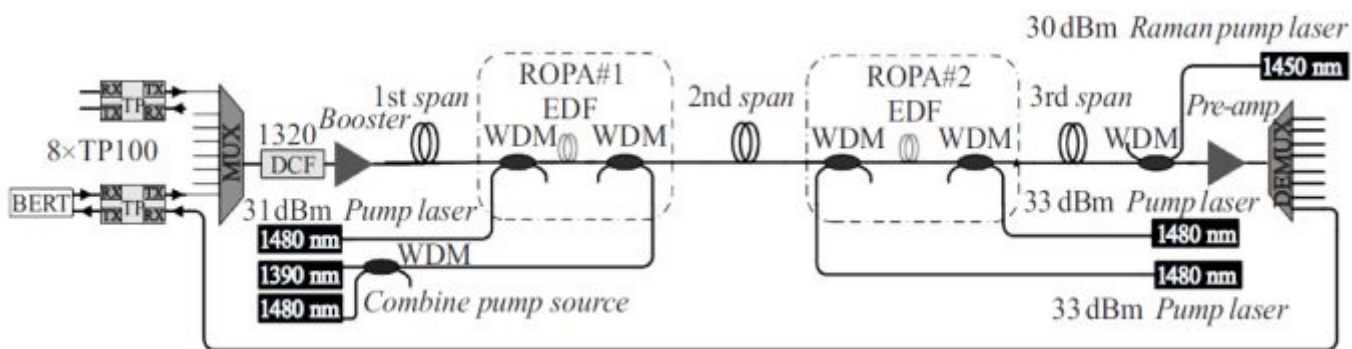


Рис. 3.26. Пример экспериментального участка оптической транспортной сети с усилителями удалённой накачки от компании T8 (www.t8.ru)

TP — транспондер, MUX — DWDM-мультиплексор, Booster — EDFA усилитель мощности, 1st, 2nd, 3rd span — первый, второй, третий пролеты (участки волокна между ROPA) в линии, EDF — волокно, легированное эрбием, WDM — мультиплексор накачки, Raman — распределенный рамановский усилитель со встречной накачкой, Pre-Amp — EDFA предусилитель, DEMUX — DWDM-демультиплексор, Pump Laser — лазер накачки. BERT — BER-анализатор, DCF — модуль компенсации дисперсии, 1390/1480 nm Combined Pump Source — двухволновой источник накачки 1390 + 1480 nm суммарной мощностью +33.5 dBm, 1450 nm 30 dBm Raman Pump Laser — лазер с длиной волны 1450 nm мощностью 1W, используемый для встречной рамановской накачки.

Контрольные вопросы

1. Что называют сетевым элементом?
2. Какие вспомогательные устройства необходимы для функционирования сетевого элемента?
3. Какие стандарты определяют построение аппаратуры сетевых элементов?
4. Какие виды упаковок предусмотрены для аппаратуры транспортных сетей?
5. Чем отличаются образцы аппаратуры, выполненные в «микро», «мини» и универсальных упаковках?
6. Что может быть включено в транспортную платформу?
7. Какие варианты обозначений имеют транспортные платформы?
8. Что общего в обозначениях сетевых элементов?
9. Какие схемные структуры предусмотрены для транспортных сетей?
10. Какие достоинства и недостатки имеют структуры «точка-точка»?
11. Какое назначение имеет структура «линейная цепь» в транспортной сети?
12. Какое назначение может иметь структура «звезда»?
13. Чем отличаются кольцевые структуры транспортных сетей?
14. Какое назначение имеет «ячеистая» структура?
15. Какие сетевые элементы входят в структуру полностью оптической сети?
16. Что используется в составе линейных сегментов для уменьшения дисперсионных искажений?
17. Какие преимущества имеют структуры оптических сетей, где используются усилители с удалённой накачкой?

4. Защита соединений транспортных сетей

Важнейшим качеством транспортных оптических сетей является защищённость аппаратуры, секций и трактов от неисправностей и повреждений. Это достигается благодаря избыточности аппаратных средств (линии, интерфейсные модули, кроссовые коммутаторы и т.д.) и использованию систем управления с программными средствами управления физическими и логическими ресурсами.

Базовые принципы защиты транспортных сетей изложены в рекомендациях МСЭ-Т G.805, G.808.1, G.841, G.842 и в рекомендациях соответствующих технологий:

- для сетей SDH это G.803, G.783 и др.;
- для сетей ATM это I.630, I.731;
- для сетей OTN/OTH это G.798, G.873.1;
- для сетей Ethernet это G.8031 и G.8032;
- для сетей TP-MPLS это G.8131.

Ниже рассматриваются варианты построения схем физической и логической защиты различных участков транспортных сетей, соединений и аппаратуры.

Соединения пользователей в транспортной сети различаются на защищенные и незащищенные. Защищенность соединений может определяться физическим построением сети (структурой физических связей сетевых элементов, маршрутами передачи цифровых циклических блоков) и логической организацией соединений (виртуальных каналов и виртуальных трактов, образованных потоками случайных ячеек и кадров).

Соединение пользователей транспортной сети может проходить через ряд участков: секцию мультиплексирования; подсеть; тракт транспортной сети (рис. 4.1).

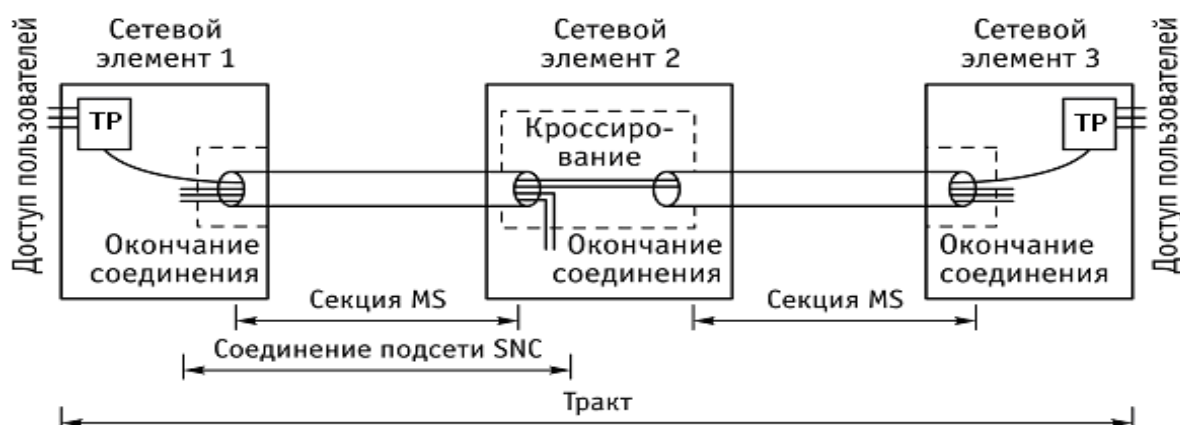


Рис. 4.1. Участки соединения пользователей в транспортной сети

Маршрут передачи называется трактом, если на его концах находятся две точки окончания TP (Termination Point) тракта. Например, точка окончания

тракта в сети SDH выполняет функции окончания тракта для получения виртуального контейнера (VC-n/m) с заголовком тракта (POH). Тракт может проходить через другие сетевые элементы в составе других соединений и при этом контролироваться через встроенные функции тандемных соединений (TCM). В сети OTN/OTN точки терминирования тракта отмечаются заголовком ODUk (ODUkOH), который, как в сети SDH, может контролироваться тандемно по 6 уровням.

Соединение подсети SNC (Sub-Network Connection) является частью тракта, завершаемого двумя точками окончания соединения, рассчитанными на функцию контроля соединения. В точке окончания соединения осуществляется только мониторинг сигналов. Например, эти точки реализуются в сетевых элементах с интерфейсами SDH. На соединении подсети SNC между двумя точками могут быть установлены другие сетевые элементы (регенераторы, оптические усилители, мультиплексоры).

Секцией мультиплексирования MS (Multiplex Section) является участок соединения (линии) между двумя мультиплексорами (SDH, OTN, ATM, Ethernet) наделённый функциями окончания секции мультиплексирования MST (Multiplex Section Termination), используемыми для обмена сигналами (STM-N, ODUk, OCh, OTM-n.m). На таком пути передачи могут быть установлены регенераторы, оптические усилители, оптические мультиплексоры и демультиплексоры и могут быть образованы секции регенерации и оптической передачи.

Соединения в транспортной сети подразделяют на односторонние и двухсторонние. Кроме того, двухсторонние соединения, в свою очередь, подразделяют на соединения в одном маршруте и в различных маршрутах. Все виды соединений представлены на рис. 4.2 а, б, в.

Принцип однонаправленного и двунаправленного соединения широко применяется в линейных и кольцевых сетях.

На рис. 4.3а и 4.3б представлены примеры схем однонаправленного и двунаправленного соединений в кольцевой транспортной сети.



Рис. 4.2а. Пример однонаправленного соединения



Рис. 4.2б. Пример двунаправленного соединения с общей передачей

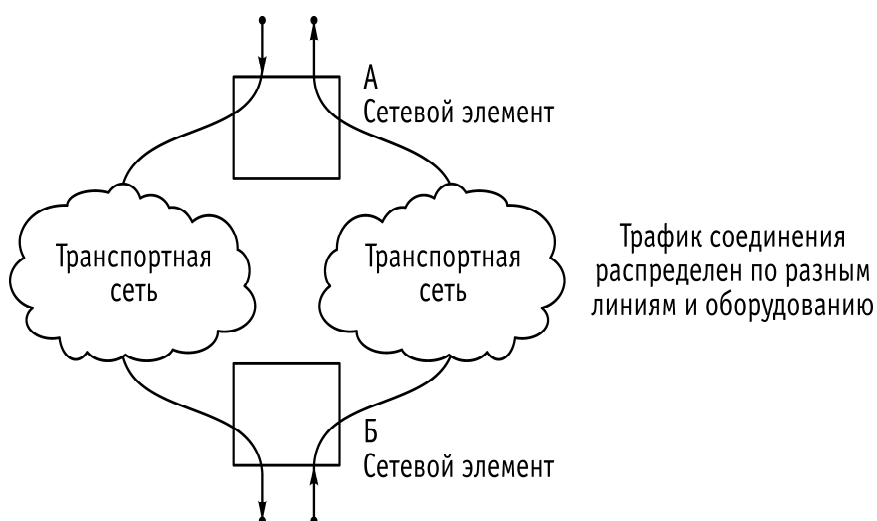


Рис. 4.2в. Пример двунаправленного соединения с раздельной передачей

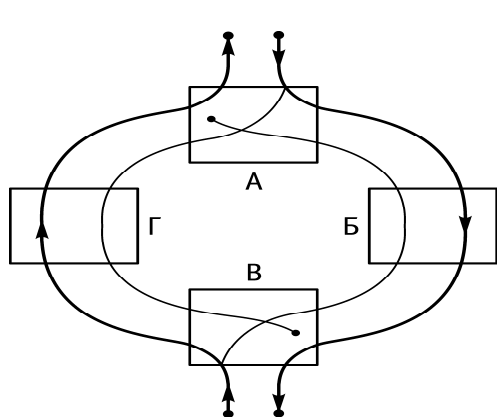


Рис. 4.3а. Пример организации соединения в кольцевой сети с однонаправленной передачей

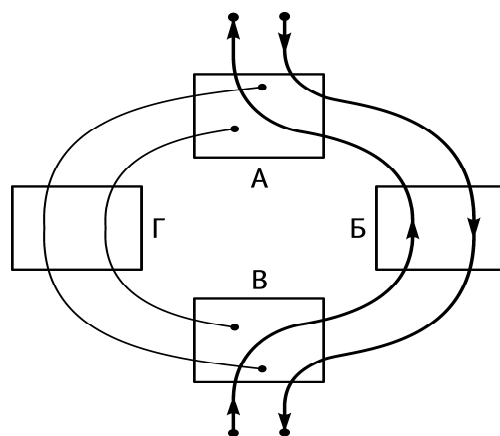


Рис. 4.3б. Пример организации соединения в кольцевой сети с двунаправленной передачей

Как видно из рисунков в кольцевой сети при любом из видов передачи (однонаправленной или двунаправленной) существует потенциальный резерв соединения, который может быть использован для защиты соединения с передачей трафика.

Приведенные способы организации соединений в транспортных сетях применимы не только для передачи и защиты электрических сигналов, но и подходят для оптических канальных и групповых сигналов в многоканальной сети с мультиплексированием волн WDM.

4.1. Защита секции мультиплексирования 1+1 (1:1)

Защита секции мультиплексирования вида 1+1 (1:1) относится к защите линейного тракта за счет резервного кабеля и оборудования. При этом в этой защите различают две возможности:

- (1+1) это одна рабочая секция мультиплексирования непрерывно дублируется одной резервной секцией мультиплексирования (рис. 4.4). При аварии рабочей секции селектор приёмной стороны подключит резервную секцию;
- (1:1) это одна рабочая секция мультиплексирования может быть продублирована в аварийном состоянии резервной секцией, которая в нормальном режиме переносит дополнительный (резервный) трафик. Этот трафик автоматически сбрасывается мостом и селектором при аварии рабочей секции (рис. 4.5).

Признаками для выполнения защитного переключения в секции мультиплексирования могут быть следующие сигналы:

- потеря сигнала на приеме (LOS, Loss of Signal);
- потеря цикла (LOF, Loss of Frame);
- избыточный коэффициент ошибок по битам ($BER > 10^{-10}$).

Управление процессами переключения с рабочей секции мультиплексирования на резервную происходит в служебных байтах (например, в STM-N байты K1, K2 заголовков MSON резервной секции, для оптических каналов OTN/OTH в ODUk это байты APS/PCC).

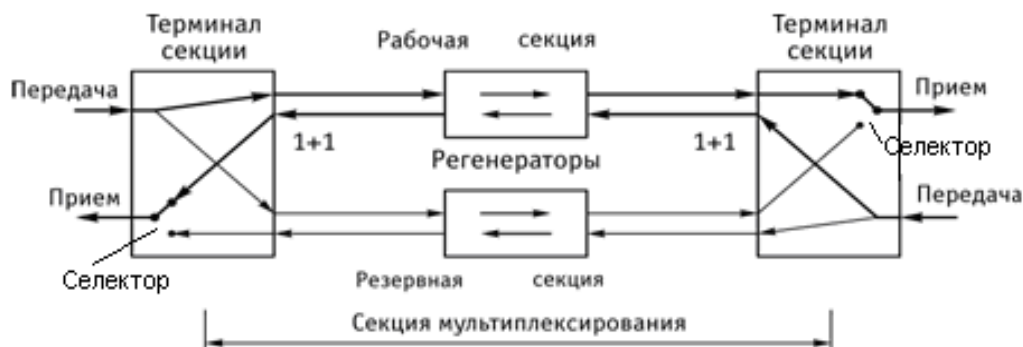


Рис. 4.4. Принцип резервирования секции 1+1

Учитывая, что передача линейных сигналов может происходить по одной или двум параллельным системам, возможны различные варианты переключений:

- синхронизированный;
- несинхронизированный.

При двунаправленной передаче в рабочей секции переключение на резерв производится в двустороннем режиме, т.е. передатчик и приемник синхронно переключаются на резерв.

При однонаправленной передаче в рабочей и резервной секциях переключение на резерв производится в одностороннем режиме, т.е. приемник выбирает лучший по качеству сигнал. Это может привести к ситуации, когда по рабочей секции происходит передача только в одном направлении, например, слева направо (по рис. 4.4), а передача в другом направлении ведется в резервной секции.

Защита секции мультиплексирования может реализовываться в обратимом и необратимом режимах. Обратимый режим предусмотрен с возвратом с резервной секции на рабочую секцию, как только на этой секции восстанавливается соответствующее качество передачи, и это состояние сохраняется в течение определенного периода времени, называемого «ожидание перед восстановлением».

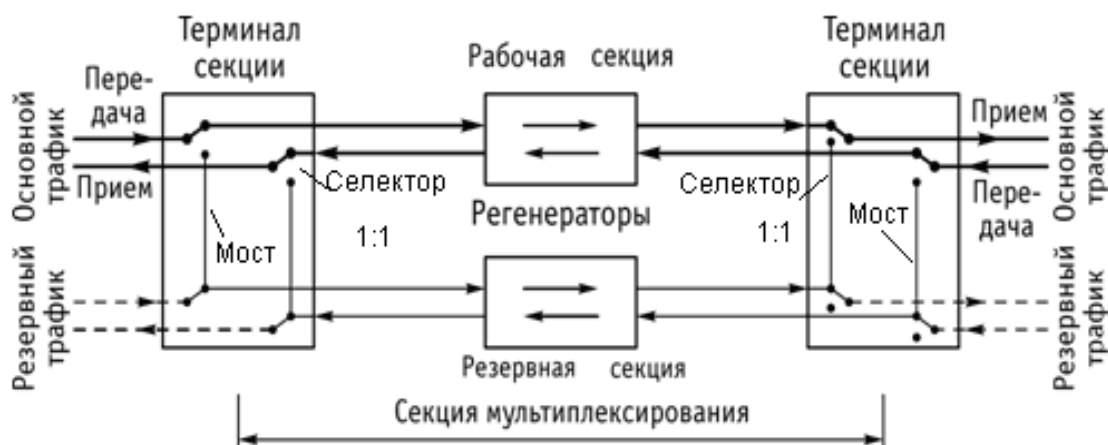


Рис. 4.5. Резервирование секции мультиплексирования 1:1

Необратимый режим предусмотрен без автоматического возврата на рабочую секцию, однако этот возврат возможен при снижении качества передачи в резервной секции ниже качества рабочей секции. Кроме того, предусматривается принудительное (ручное) переключение на резервную секцию и обратно на рабочую.

При защите секции оптического мультиплексирования WDM OMS предусматривается деление мощности многоканального сигнала WDM пополам с последующей передачей в различных волокнах различных кабельных линий (рис.4.6.).

На приемной стороне оптический коммутатор, управляемый пороговым устройством контроля оптической мощности, гарантированно быстро (не более чем за 50 мс) может изменить направление приема оптического сигнала.

Помимо оптического защитного переключения в оптической сети OTN возможна реализация схемы защитного переключения с использованием байт управления APS (Automatic Protection Switch) в заголовке ODUk [3].

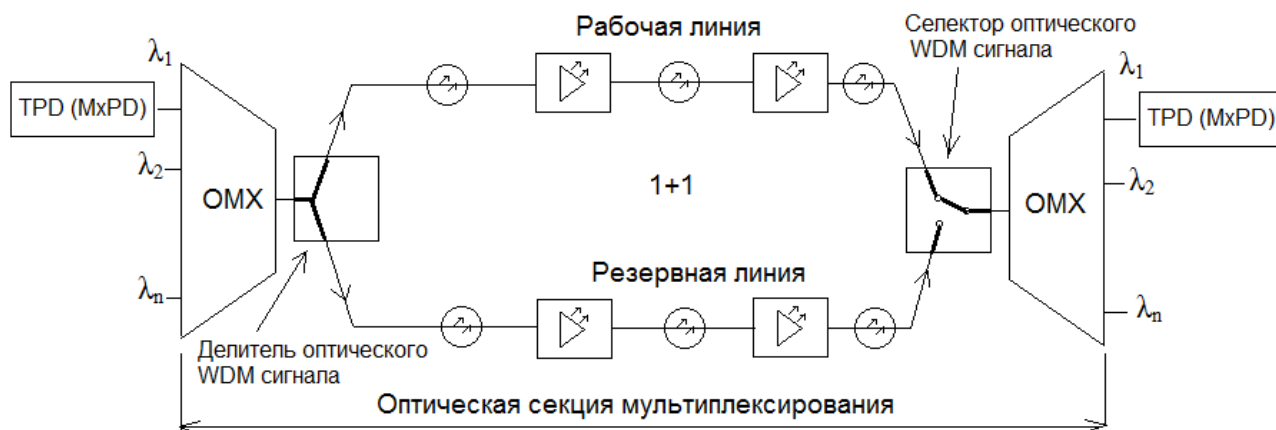


Рис. 4.6. Защита секции оптического мультиплексирования OMS

Оптический разветвитель-коммутатор канального сигнала OB-S делит сигнал, приходящий от транспондера MS-D100EQ между отдельными каналами, организуемыми по разным маршрутам и оптические мультиплексоры и демультиплексоры (OADM) и обеспечивает выбор лучшего сигнала на приёме (рис.4.7).

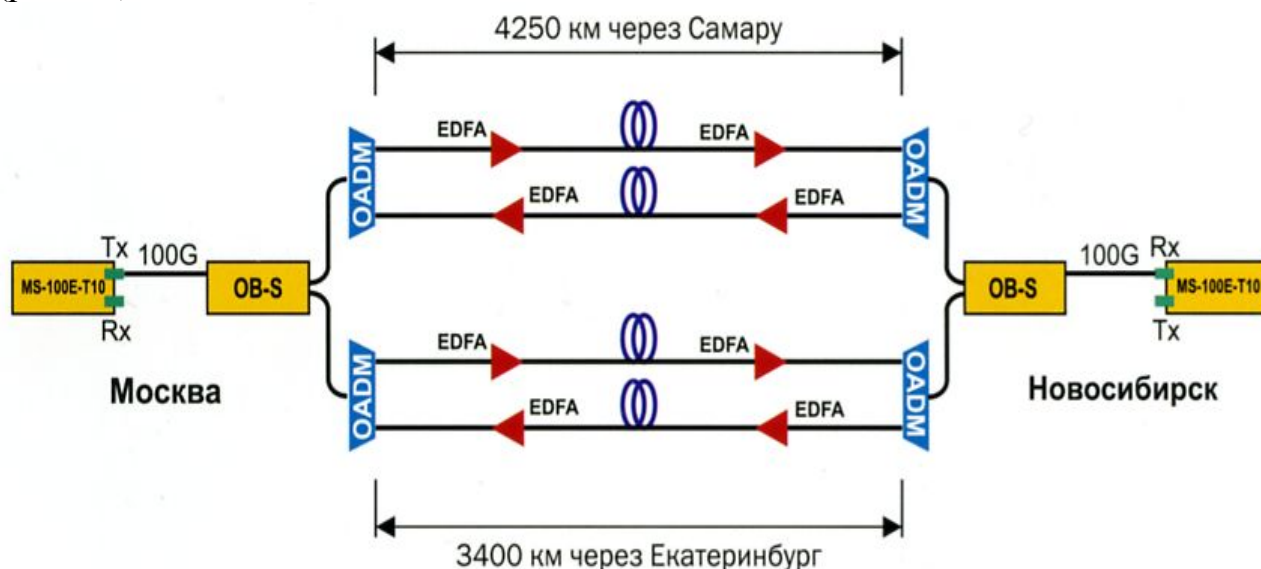


Рис. 4.7. Пример схемы защиты канала в оптической секции мультиплексирования на оборудовании ВОЛГА Т8 (www.t8.ru)

Протокол защитного переключения APS уровня блока данных оптического канала ODUk реализуется через четыре байта заголовка ODUk [3].

4.2. Защита секции мультиплексирования в кольцевой сети

Кольцевая транспортная сеть может иметь ряд вариантов по организации защиты трафика пользователей в однонаправленном и двунаправленном кольцах. При этом различают защиту секций мультиплексирования и защиту соединений подсети (защиту отдельных трактов). В предлагаемом разделе рассматривается защита секции мультиплексирования, обозначаемая MS-SPRing (Multiplex Section Shared Protected Rings). При такой защите независимо от организации кольца (одно или двунаправленное) все тракты переключаются на резервные ресурсы одновременно.

Пример построения схемы однонаправленного кольца на 2-х волокнах и функционирование защиты представлено на рис. 4.8а,б, где находятся пять сетевых элементов (А, Б, В, Г, Д) SDH (мультиплексоры выделения/ввода), через которые организовано соединение, например, тракт низкого порядка VC-12. Этот тракт заканчивается в сетевых элементах А и В, но проходит транзитом благодаря внутренней кроссовой коммутации через сетевые элементы Б, Г, Д.

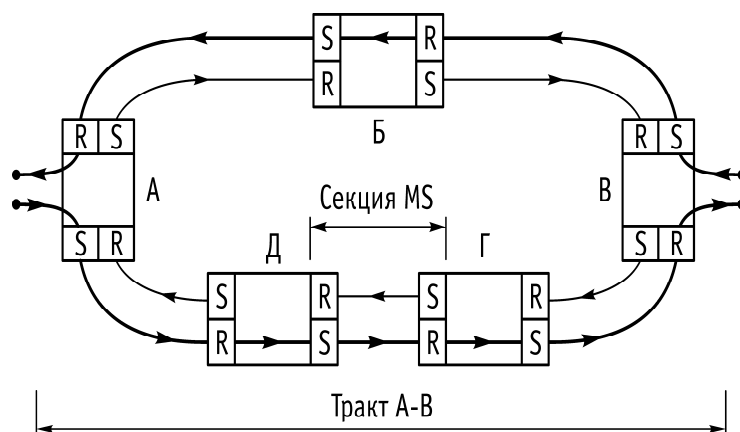


Рис. 4.8а. Однонаправленное кольцо с защитой секции MS

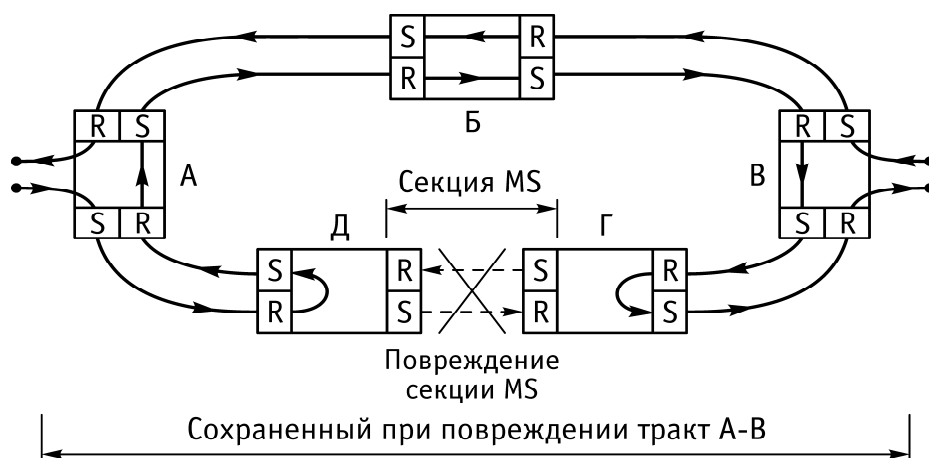


Рис. 4.8б. Однонаправленное кольцо с защитой секции MS при повреждении линии

Аналогично можно организовать соединение между любой парой сетевых элементов. При этом между соседними сетевыми элементами организована 2-х волоконная передача STM-N между точками S и R, (S, sender – передача, R, receive – прием). Таким образом, создано два направления (два кольца) передачи независимые друг от друга (внутреннее и внешнее кольца). Все рабочие соединения транспортной сети в интересах пользователей организуются во внешнем кольце. Внутреннее кольцо на всех секциях мультиплексирования остается свободным от трафика и рассматривается как резерв для защиты любой секции мультиплексирования. Пример защитной реконфигурации в кольце показан на рис. 4.8б. Поврежденная секция мультиплексирования MS между сетевыми элементами Д и Г обходится за счет изменения конфигурации передачи из внешнего кольца на внутреннее и тем самым сохранения тракта А-В в рабочем состоянии, как и для других возможных трактов между любой парой сетевых элементов. Такие функции переключения реализуются на уровне VC-12 и VC-4. При большом количестве VC-12 и VC-4, например, в STM-64, реализовать эти функции одновременно представляет сложность в построении оборудования и программ управления. По этой причине подобные защиты секции MS рекомендованы для колец малой емкости, т.е. обычно не выше STM-4.

Для кольцевых сетей средней емкости (например, STM-16) может быть применена защита в двунаправленном кольце при работе каждой секции в 2-волоконном режиме (рис.4.9а, б).

Каждая секция MS содержит два волокна, в каждом из которых ведется передача STM-N. При такой организации передачи необходимо иметь половину емкости STM-N свободной от соединений пользователей. Эта свободная емкость будет использоваться в качестве защитной (рис. 4.9б).

После устранения повреждения в кольце происходит восстановление рабочего состояния. Норматив времени на защиту составляет 50 мс. Однако при большом числе сетевых элементов выполнение этого норматива может быть затруднено длительным процессом обмена информацией между взаимодействующими мультиплексорами посредством байт K1, K2 в заголовках MSON.

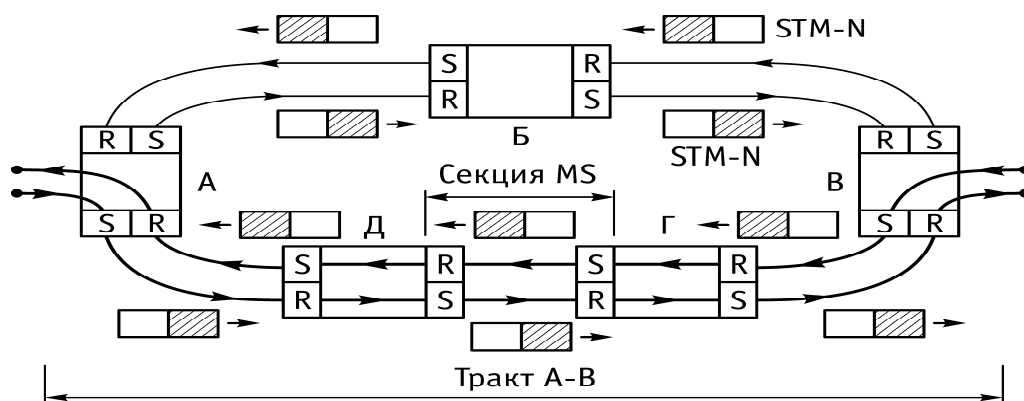


Рис. 4.9а. Двунаправленное кольцо с защитой секции MS

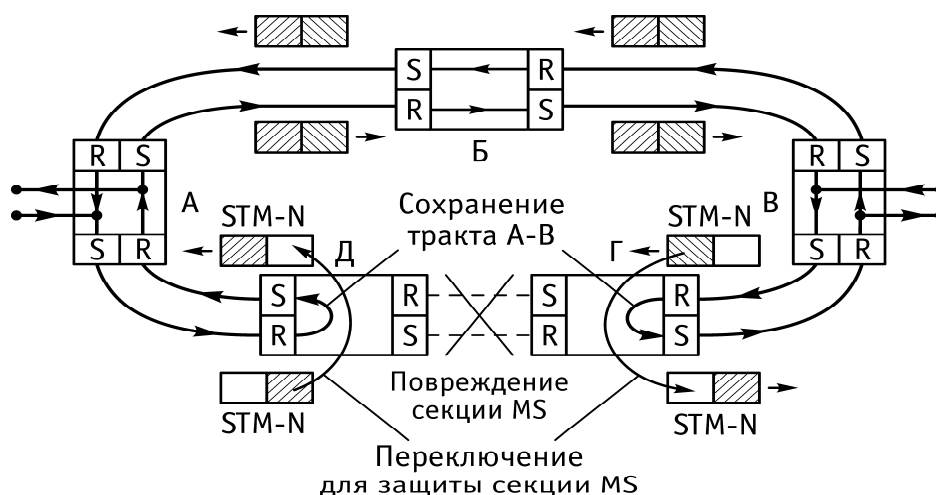


Рис. 4.9б. Двухнаправленное кольцо с защитой секции MS при повреждении

Для кольцевой транспортной сети большой емкости, например, STM-64, может использоваться 4-х волоконное кольцо с двухнаправленной передачей и защитой секции мультиплексирования. В этом случае все соседние сетевые элементы в кольце должны соединяться двумя кабельными линиями с использованием двух пар волокон в каждой. Аппаратура сетевых элементов должна оснащаться четырьмя агрегатными интерфейсами (рис. 4.10а).

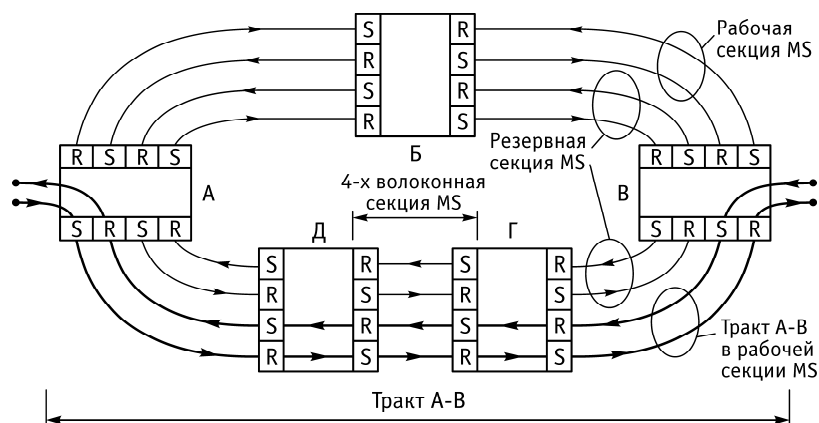


Рис.4.10а. 4-х волоконное кольцо с защитой секции MS

В 4-х волоконном кольце каждая секция мультиплексирования MS между соседними сетевыми элементами может быть использована полностью для соединений. При этом резервная секция, организованная по другим волокнам, полностью свободна от соединений на всех участках кольца. При повреждении любой секции MS в кольце должно произойти переключение на резервную секцию всех соединений сети. При этом все тракты сохраняются (рис. 4.10б).

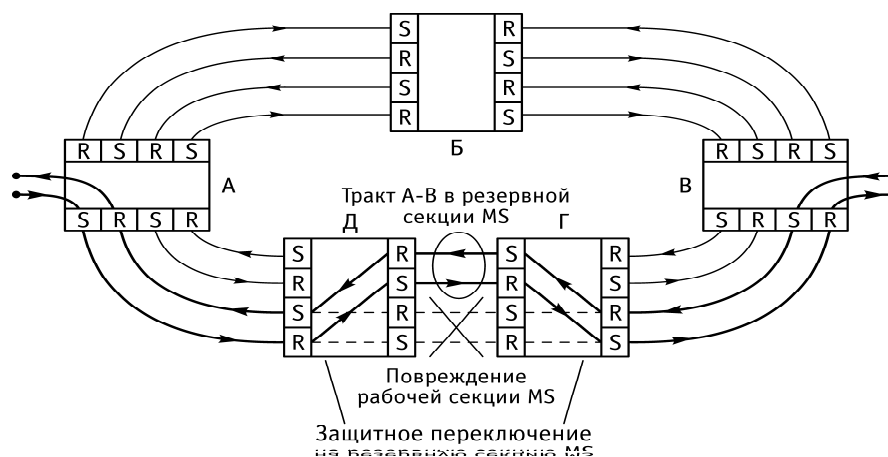


Рис.4.10б. 4-х волоконное кольцо с защитой секции MS при повреждении

Переключение происходит через функции MSP соседних мультиплексоров. Эти функции поддерживаются обменом байтами K1, K2 заголовков MSON резервной секции MS. Четырехволоконные кольцевые сети сохраняют свою работоспособность и при двойном повреждении любой из секций мультиплексирования MS (рис. 4.10в).

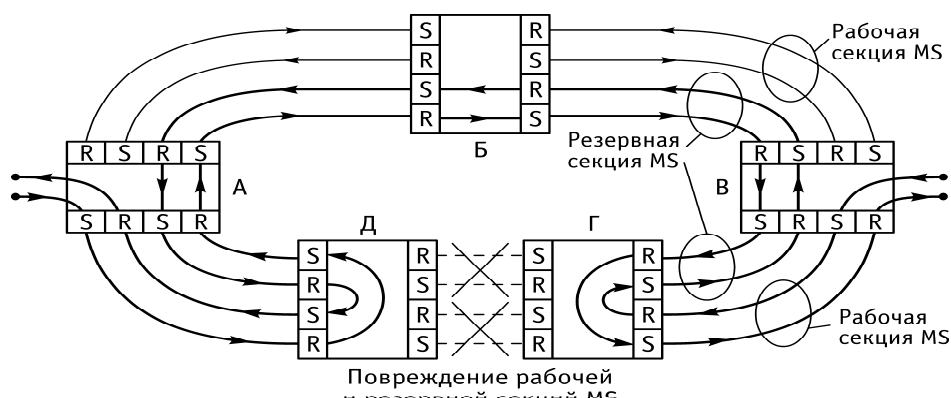


Рис. 4.10в. 4-х волоконное кольцо с защитой секции MS при двойном повреждении

4.3. Защита соединения тракта

Защита соединений тракта транспортной сети может быть рассмотрена для линейной и кольцевой топологий. Функции защиты трактов высокого и низкого уровней поддерживаются оконечными (терминальными) и промежуточными мультиплексорами. Кроме того, поддержка функций защиты программируется в матрицах коммутации, а промежуточный контроль качества трактов выполняется блоками функций тандемного контроля. Тракт, организованный в сложной разветвленной сети разбивается на участки (подсети), где может быть реализована защита соединения SNC/P (Sub Network Connection Protection). Различают подвиды SNC/P:

SNC/I, Sub Network Connection Protection with Inherent Monitoring – резервирование/защита на уровне соединения подсетей с внутренним мониторингом;

SNC/N, Non-intrusively Monitored Sub-Network Connection protection – резервирование/защита на уровне соединения подсетей без внутреннего мониторинга.

Защита SNC/P проводится по схеме 1+1, т.е. на рабочий тракт должен быть предусмотрен свободный резервный. Защита SNC/P возможна и в смешанных сетях (кольцевых и линейных). При этом соединения могут выполняться одно- и двунаправленными. Пример построения однонаправленного соединения в кольцевой сети приведен на рис. 4.11а. Защитное переключение в этой сети показано на рис. 4.11б. При этом переключении соединение из однонаправленного преобразуется в двунаправленное. Время переключения для защиты соединения нормировано величиной 30мс, что при его соблюдении сохраняет трафик этого соединения, например, телефонные каналы.

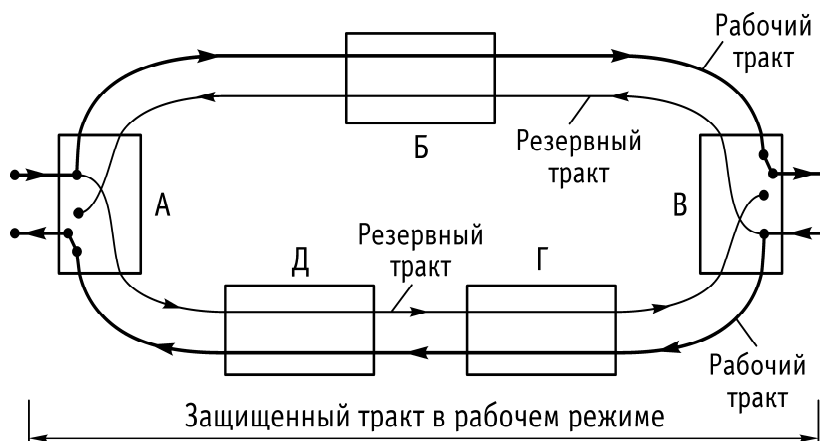


Рис. 4.11а. Однонаправленное кольцо с защищенным трактом

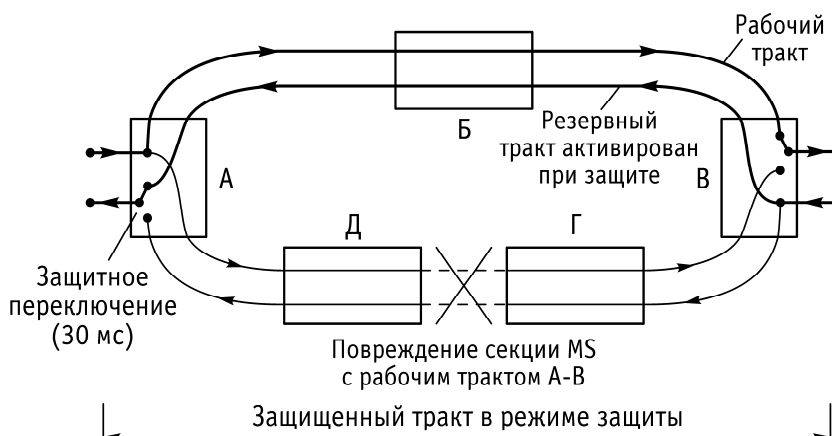


Рис. 4.11б. Однонаправленное кольцо с защищенным трактом при повреждении секции мультиплексирования

Сложные смешанные линейные и кольцевые транспортные сети имеют развитый механизм защиты SNC/P. Этот механизм реализуется через кроссовые коммутаторы, через двойные пересечения транспортных колец и т.д. Тракты, состоящие из цепочек соединений SNC должны иметь в таких сетях надежную защиту. На рис. 4.12а приведен пример организации соединения типа SNC/P в двойной кольцевой сети. На рис. 4.12б и 4.12в показаны примеры защитных коммутаций SNC/P на отдельных участках соединения тракта.

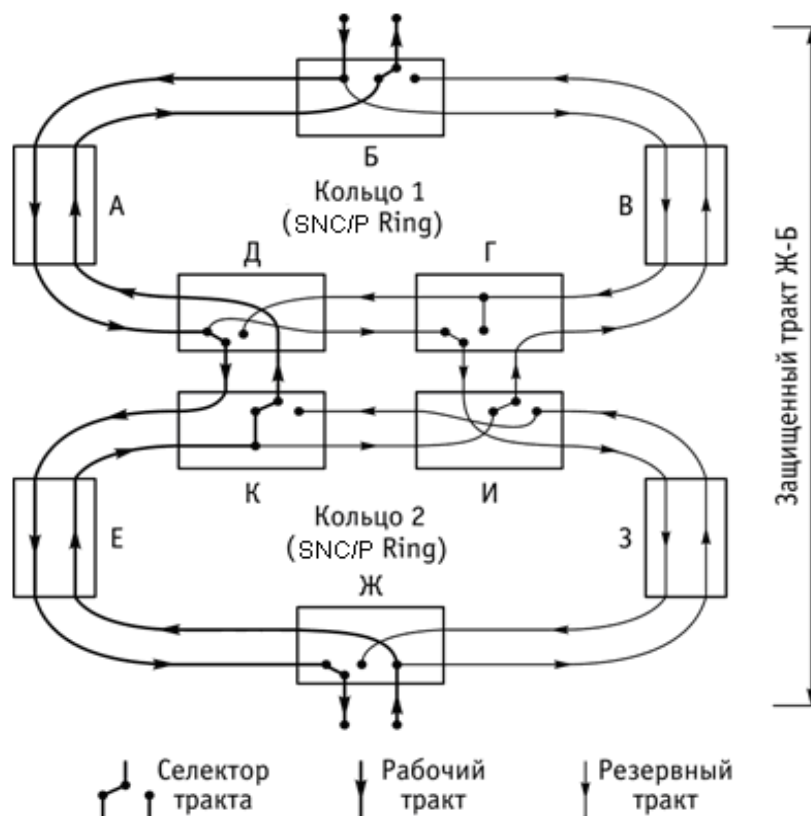


Рис. 4.12а. Структура защищаемого тракта в двух взаимодействующих кольцевых подсетях (SNC/P) в рабочем режиме

Поставщики сетевого оборудования для транспортных сетей используют различные системы обозначений механизмов организации защитных переключений.

в Европе принято обозначать:

- 2F-MS-SPRing, 2 Fiber Multiplex Section Shared Protected Rings – 2-х волоконная секция мультиплексирования с применением защиты колец;
- 4F-MS-SPRing, 4 Fiber Multiplex Section Shared Protected Rings – 4-х волоконная секция мультиплексирования с применением защиты колец;
- 2F-SNC/P, 2 Fiber-Sub-Network Connection Protection Ring – 2-х волоконное соединение подсети с защитой в кольце.

В Северной Америке и некоторых других странах принято обозначать:

- 2F BLSR, 2 Fiber Bi-directional Line-Switched Ring – 2-х волоконное двунаправленное кольцо с защитным переключением линейных сегментов;

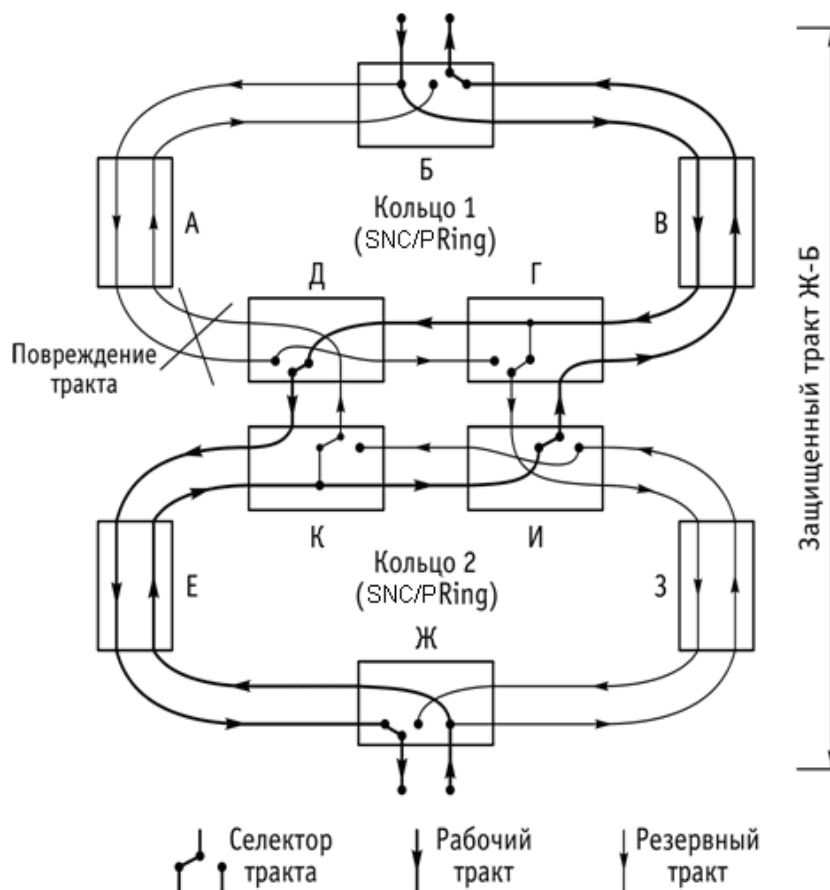


Рис. 4.126. Структура защищаемого тракта в двух взаимодействующих кольцевых подсетях (SNC/P) в режиме повреждения тракта в первом кольце

- 4F BLSR, 4 Fiber Bi-directional Line-Switched Ring – 4-х волоконное двунаправленное кольцо с защитным переключением линейных сегментов;
- 2F UPSR, 2 Fiber Unidirectional Path-Switched ring – 2-х волоконное однонаправленное кольцо с переключением тракта.

Эти обозначения в своем порядке перечисления соответствуют:

2F-MS-SPRing и 2F BLSR;

4F-MS-SPRing и 4F BLSR;

2F-SNCP и 2F UPSR.

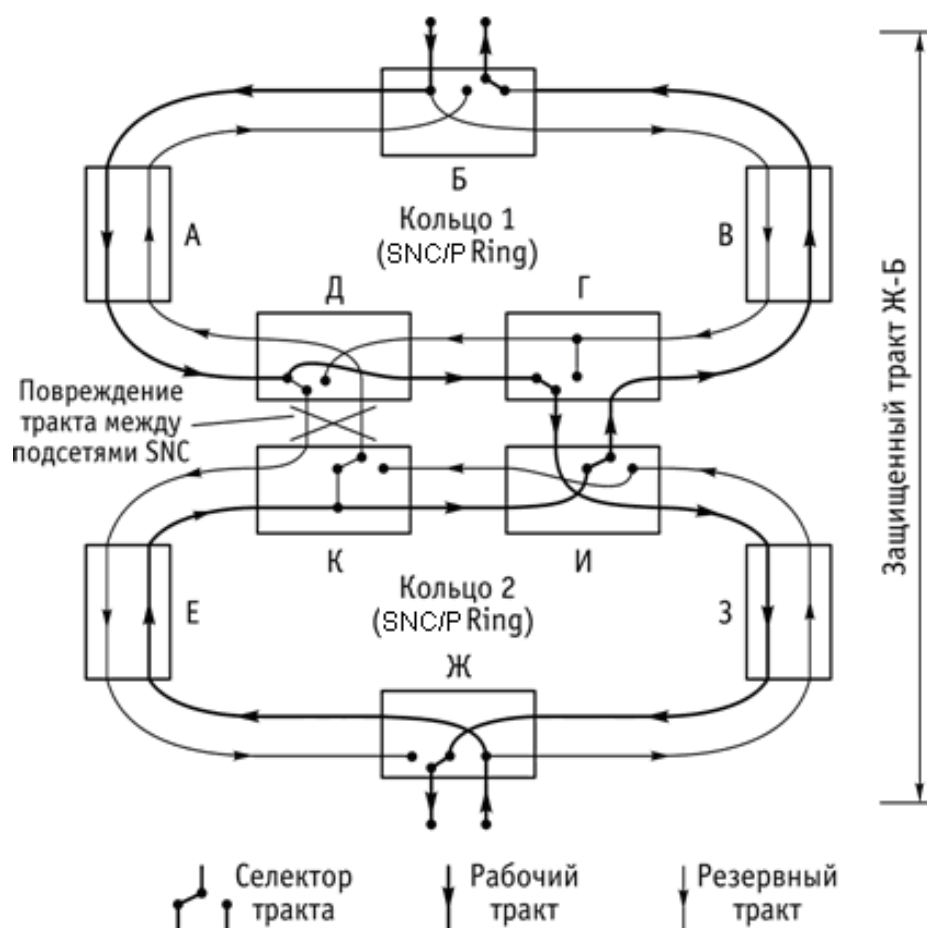


Рис. 4.12в. Структура защищаемого тракта в двух взаимодействующих кольцевых подсетях (SNC) в режиме повреждения тракта между подсетями

4.4. Защитные переключения в сети с многоканальной передачей WDM

Функции защитных переключений оптических каналов в сети с многоканальной передачей возлагаются на фотонные коммутаторы. Эти коммутаторы имеют различные конструкции и характеристики, в частности, что важно для переключения, быстродействие. Применение указанных коммутаторов в транспортных сетях определяется этапом развития последних. Защита соединений на уровнях трактов, секций и каналов в кольцевых и ячеистых оптических сетях возможно только с развитым сервисным управлением по отдельным каналам. Это обусловлено необходимостью маршрутизации рабочих и защитных оптических соединений, преобразованием волн в узлах и их динамическим управлением. В оптических сетях с коммутацией волн и пакетов на волнах динамическая защита является неременным условием реализации. Для реализации динамической защиты на уровне соединений каналов и трактов оптической сети необходимо применение быстродействующих коммутаторов и частотных селекторов WSS (Wavelength Selective Switch). Такой WSS обеспечивает коммутацию волновых каналов по

направлениям (маршрутам), поддерживает выделение и ввод волновых каналов, регулирует уровень мощности каждого канала (рис. 4.13).

Использование групп WSS совместно с оптическими мультиплексорами и демультиплексорами позволяет строить узлы выделения /ввода с защитой волновых каналов, групп волновых каналов (оптических модулей), маршрутов (трактов) и секций мультиплексирования и передачи. Пример построения сети с переключением волн в WSS и использованием этой коммутации для защиты соединений отдельных волн приведен на рис. 4.14.

Для обозначения защитных функций в оптических сетях кольцевого типа используются обозначения с приставкой «О»:

O-ULSR или OMS-DPRing (1+1) – (1:1);

O-BLSR или OMS-SPRing (1:N) – (M:N);

O-UPSR или OCh-DPRing (1+1) – (1:1);

O-BPSR или OCh-SPRing(1:N) – (M:N).

Буквенные индексы D и S обозначают:

D – *dedicated* fiber line или Wavelength, т.е. переключение на назначенное резервное волокно или оптическую волну (волновой канал OCh);

S – *shared* fiber link или Wavelength, т.е. переключение на определенную волоконную линию или волну (оптический канал OCh).

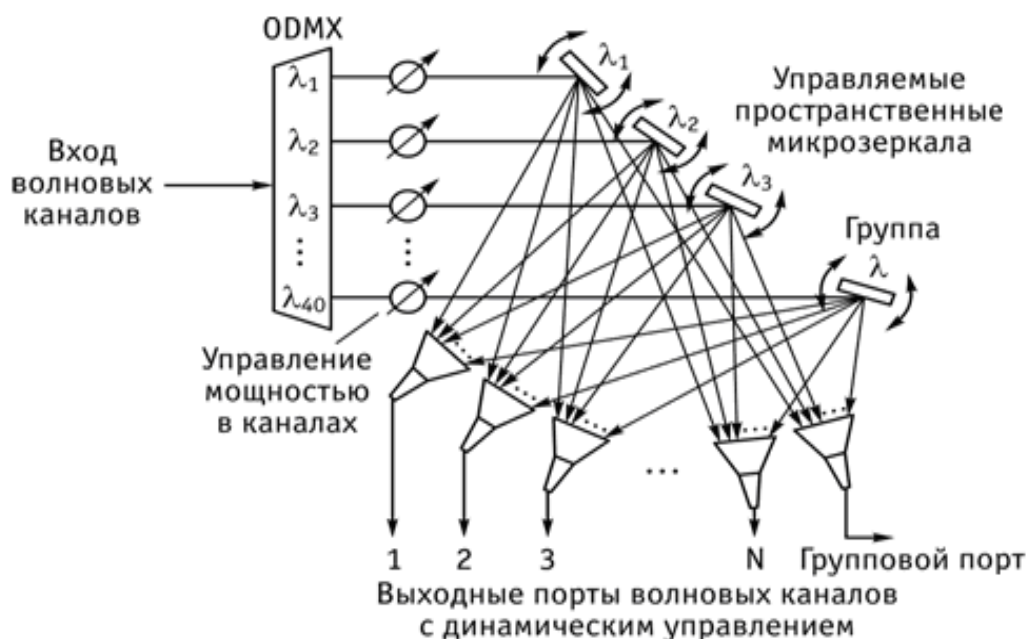


Рис. 4.13. Пример общего построения динамически управляемого частотного селектора-коммутатора WSS

Другие примеры кольцевых и линейных конфигураций оптических сетей, соединений и вариантов их защиты подробно рассмотрены в [3, 15]. Примеры построения узлов выделения/ввода и защитной коммутации на основе WSS оборудования ВОЛГА Т8 приведены в каталоге www.t8.ru.

4.5. Защитные переключения в транспортных сетях ATM и Ethernet

Возможности защитного переключения на уровне ATM согласно Рекомендации МСЭ-Т I.630 могут быть обеспечены на уровне виртуальных путей VP или виртуальных каналов VC.

Определены пять различных схем защиты VP и VC:

- 1) 1+1/1:1 защита тракта;
- 2) 1+1/1:1 защита соединения SNC/S (1+1/1:1 sublayer monitored subnetwork connection protection) с внутренним мониторингом соединения подсети;
- 3) 1+1 защита соединения SNC/N (1+1 non-intrusive monitored individual VP/VC subnetwork connection protection - только однонаправленная) без внутреннего мониторинга;
- 4) 1+1/1:1 групповая защита тракта/T;
- 5) 1+1/1:1 групповая защита соединения SNC/T (1+1/1:1 test trail monitored subnetwork connection protection) с тестируемым мониторингом тракта.

Все эти виды защиты обеспечиваются потоком служебных ячеек управления сети ATM.

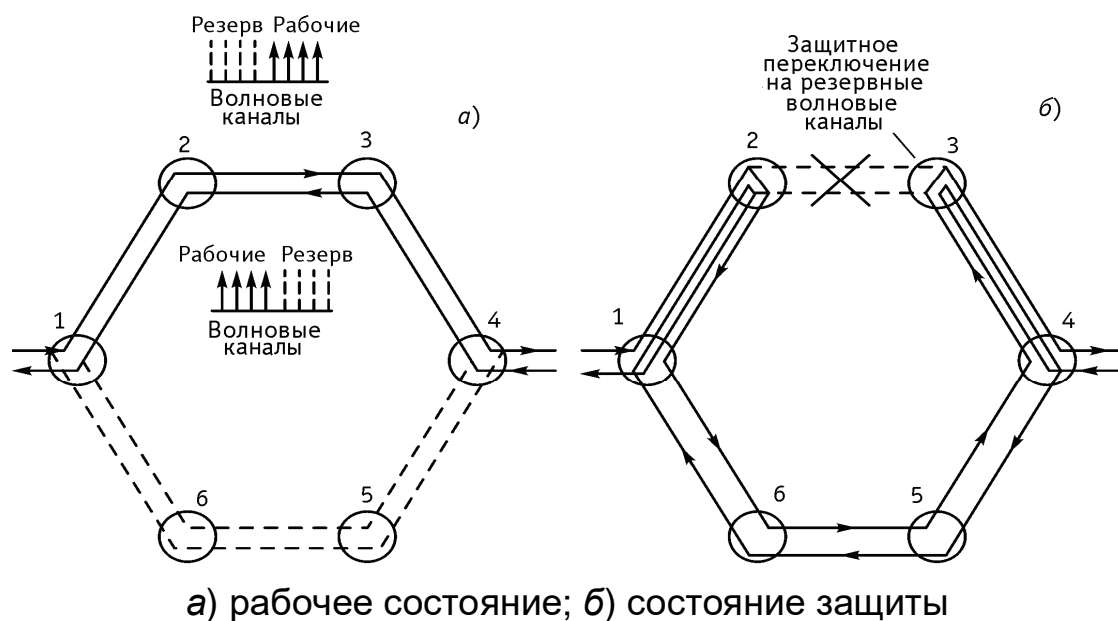


Рис. 4.14. Пример защищенного двунаправленного оптического соединения в кольцевой сети OMS-SPRing

Соединения в транспортных сетях Ethernet могут защищаться как средствами физического уровня, так и протокольными средствами.

Средства физического уровня используются при организации соединений через среды SDH, OTN/OTH, RPR, PDH, в которых предусмотрены встроенные средства автоматического защитного переключения в интервале времени менее 50 мс. Это гарантирует сохранение соединений сети Ethernet. Однако при построении локальных сетей, сетей доступа, местных и внутризональных транспортных сетей Ethernet с использованием различных электрических и

оптических интерфейсов для поддержки физических соединений типа «точка-точка» средств APS физического уровня может и не быть.

Для разветвленной физической конфигурации сети Ethernet может использоваться протокол «охвата деревьев» STP (Spanning Tree Protocol), который создает несколько путей прохождения трафика. Один из путей в нормальном режиме используется, а остальные заблокированы. При аварии происходит активизация одного из резервных путей. Время защитного переключения может составлять от 10 мс до 1с в зависимости от топологии сети, что не гарантирует высокого качества соединения сети Ethernet. По этой причине МСЭ-Т ведет непрерывную работу над стандартизацией функций защитного переключения в транспортных сетях Ethernet. Примером этому являются рекомендации G.8031 и G.8032, в которых определены протоколы E-APS (Ethernet Automatic Protection Switching). Они предусматривают защитные переключения соединений сети Ethernet следующих видов:

- 1+1, т.е. трафик одновременно следует от одной точки к другой двумя независимыми виртуальными путями с выбором лучшего на приеме;
- 1:1, т.е. трафик следует только в одном пути от точки к точке, а другой альтернативный путь создан, но не используется до аварийного состояния рабочего пути;
- архитектура защиты может иметь одно или два направления;
- протокол G.8031 не поддерживает кольцевые и смешанные физические соединения в сети, протокол G.8032 поддерживает эти соединения;
- протоколы не поддерживают защитные соединения STP;
- протоколы реализуются через служебные кадры Ethernet, поддерживающие соединения с функциями технической эксплуатации OAM и TCM.

При реализации E-APS для линейной сети гарантируется время переключения до 50 мс.

Согласно рекомендации G.8032 в кольцевых сетях Ethernet протоколом R-APS может поддерживаться режим защитных переключений соединений также за время 50 мс.

Механизмы защитных переключений в транспортных сетях с использованием технологии TP-MPLS аналогичны рассмотренным для ATM.

Контрольные вопросы

1. Почему необходима защита аппаратуры и соединений в транспортных сетях?
2. Где определены базовые принципы защиты транспортных сетей?
3. Какие участки соединений транспортной сети подлежат защите?
4. Что называют защищенным трактом?
5. Что называют соединением подсети?
6. Какие секции мультиплексирования подлежат защите?

7. Чем отличаются однонаправленные и двунаправленные соединения транспортных сетей?
8. Чем отличаются защиты вида 1+1, 1:1, 1:N?
9. Сколько времени требуется для переключения на резервную секцию мультиплексирования OMS?
10. Чем принципиально отличается защита оптической секции мультиплексирования от электрической?
11. Какие виды защиты предусмотрены в кольцевых сетях?
12. Какие виды защиты соединений на уровне трактов различают в транспортных сетях?
13. Что обозначает сокращение 2F-MS-SPRing?
14. Что особенного в защите соединений сетей ATM и Ethernet?

5. Синхронизация и управление в оптических транспортных сетях

Составной частью транспортных сетей связи являются сети синхронизации и сети управления, которые строятся в соответствии с международными стандартами: ISO/OSI, IEEE, ITU-T (МСЭ-Т) и т.д.

Основными стандартами, определяющими построение сетей тактовой синхронизации (ТСС), признаны стандарты МСЭ-Т:

- G.781, Synchronization layer functions – функции уровня синхронизации;
- G.810, Definitions and terminology for synchronization networks – определения и терминология для сетей синхронизации;
- G.811, Timing characteristics of primary reference clocks – характеристики тактов первичного эталонного генератора;
- G.812, Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks – требования по выбору узла тактовой сетевой синхронизации;
- G.813, Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC) – характеристики тактов оборудования синхронизации SDH.

Для построения сети синхронизации в каждой из транспортных технологий разработаны специальные стандарты, которые согласованы с выше перечисленными. К ним относятся:

- по синхронизации сети SDH - G.803, Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH) – архитектуры транспортных сетей, основанных на синхронной цифровой иерархии;
- по синхронизации сети ATM – I.361, B-ISDN ATM adaptation layer specification type 1 – спецификация первого типа адаптационного уровня ATM; I.432, B-ISDN user-network interface – physical layer specification – спецификация физического уровня широкополосной цифровой сети с интеграцией услуг Ш-ЦСИС на интерфейсе «пользователь-сеть»;
- по синхронизации сети OTN-OTH - G.8251, The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN) – контроль джиттера и вандера в оптической транспортной сети; G.798, Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks – характеристики функциональных блоков оборудования оптической транспортной иерархии;
- по синхронизации сети Ethernet - G.8261, Timing and synchronization aspects in packet networks – аспекты тактирования и синхронизации в пакетных сетях; G.8262, Timing characteristics of synchronous ethernet equipment slave clock (EEC) – характеристики тактов генератора оборудования Ethernet.

Наиболее доступное и понятное изложение основных аспектов синхронизации транспортных сетей приведено в [21, 22, 23]. Однако это изложение не полностью охватывает проблемы синхронизации транспортных сетей. Поэтому необходимо внимательное изучение разделов этого учебного пособия.

Основными стандартами, определяющими построение сетей управления, также признаны стандарты МСЭ-Т серии М, из которых фундаментальным

считают М.3010, Principles for a telecommunications management network – принципы сетей управления телекоммуникациями и М.3060, Принципы управления сетями последующих поколений.

Для построения сети управления в каждой из транспортных технологий разработаны специальные стандарты, которые являются продолжением фундаментальных. К ним относятся:

- по управлению сетью SDH - G.784, Synchronous Digital Hierarchy Management, G.773 – Protocol Suites for Q-Interfaces for Management of Transmission Systems, G.774, Synchronous digital hierarchy (SDH) □ Management information model for the network element view;

- по управлению сетью ATM - I.371, Traffic control and congestion control in B-ISDN, I.751, ATM Management of the Network Element View;

- по управлению сетью OTN-OTH - G.874, Management aspects of the optical transport network element, G.874.1 Optical transport network (OTN): Protocol-neutral management information model for the network element view;

- по управлению сетью Ethernet - G.8011/Y.1307, Ethernet over Transport – Ethernet services framework, G.8012/Y.1308, Ethernet UNI and Ethernet NNI;

- по управлению сетью T-MPLS – G.8151, Management aspects of the T-MPLS network element.

5.1. Проблемы тактовой синхронизации

Любая цифровая система в своей основе требует тактовый задающий генератор, который должен синхронизировать все внутренние и внешние операции по обработке цифровых данных. Наибольшие сложности в цифровых системах возникают, когда необходимо наладить взаимодействие различных в своей основе цифровых систем, т. е. систем с различными тактовыми генераторами и функциональными реализациями (системы передачи и коммутации). Даже внутри одной системы, например системы передачи, требуется синхронизировать приемник сигнала с передатчиком (тактовый синхронизм, цикловой синхронизм, сверхцикловой синхронизм). Применение разных тактовых генераторов может повлечь за собой сбой передачи, если не произвести принудительной синхронизации генератора приемника генератором передатчика. При этом на стабильность частот генераторов на обоих концах линии цифровой передачи будут влиять различные физические факторы, которые вызывают дрожание фазы хранирующих импульсов. Этими факторами являются: шум и помехи, действующие на цепь синхронизации в приемнике; изменение длины пути передачи сигнала обусловлены температурными перепадами, рефракцией в атмосфере и т. д.; изменение скорости распространения сигналов в физической среде (в проводных и беспроводных линиях); нарушение регулярности поступления хранирующей информации; доплеровские сдвиги от подвижных оконечных устройств; переключения в линиях (срабатывание автоматического резервирования); систематические

дрожания фазы цифрового сигнала, возникающие в регенераторах (повторителях) и т.д.

5.2. Определения тактовой сетевой синхронизации

Термины и определения ТСС первоначально приведены в рекомендации МСЭ-Т G.810. Ряд терминов и определений, которые необходимы для дальнейшего изложения материала, приведены ниже.

Тактовая сетевая синхронизация представляет собой один из видов синхронизации, необходимой для обеспечения функционирования цифровых систем передачи и коммутации. Тактовая синхронизация это процесс точного временного соответствия между принимаемым сигналом и последовательностью тактовых импульсов [22].

В цифровых системах понятие "синхронизм" тесно связано с понятием "проскальзывания" (slips).

Проскальзывание – исключение или повторение в цифровом сигнале одного или нескольких бит, происходящее вследствие различия в скоростях записи и считывания двоичных данных в буферных устройствах.

Проскальзывание может быть управляемым или неуправляемым.

Проскальзывание, которое не приводит к сбою цикловой синхронизации, называют управляемым. При этом сигнал с потерями восстанавливает синхронизм.

При неуправляемом проскальзывании моменты потери и повторения позиций в цифровом сигнале невозможны.

Количество проскальзываний является предметом нормирования и служит основой определения требований к тактовым генераторам сети синхронизации.

Нормирование проскальзываний введено с рекомендации МСЭ-Т G.822 для стандартного цифрового условного эталонного соединения длиной 27 500 км основного цифрового канала 64 кбит/с между абонентскими окончаниями. Это соединение представляет собой соединение двух национальных сетей через несколько международных транзитов и насчитывает в общей сложности до 13 узлов и станций (из них пять центров международной коммутации и на каждой национальной сети по третичному, вторичному и первичному центру коммутации) (рис.5.1).

В таком соединении может происходить:

- а) не более пяти проскальзываний за 24 часа в течение 98,9% времени работы;*
- б) более пяти проскальзываний за 24 часа, но менее 30 за один час в течение 1% времени работы;*

в) более 30 проскальзываний за один час в течение 0,1% времени работы.

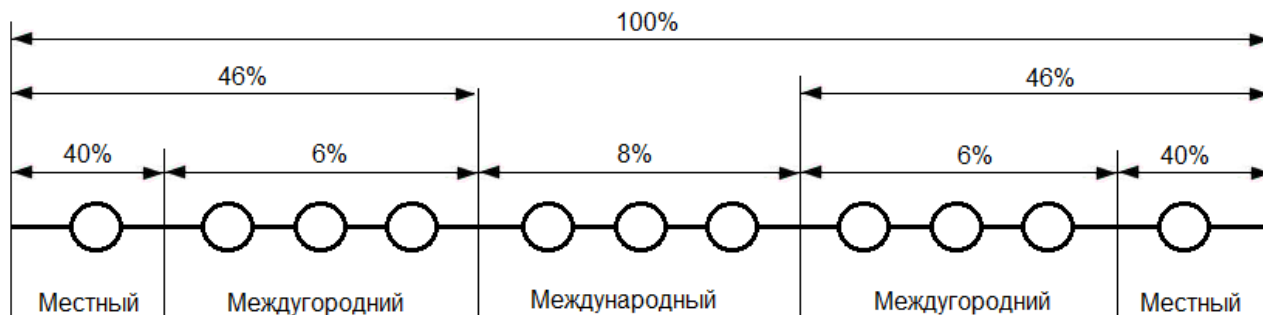


Рис.5.1. Правило распределения проскальзываний по участкам междугородных и международных соединений (по рекомендации ITU-T G.822)

Время работы – не менее одного года. Качество, обозначенное а), соответствует псевдосинхронному режиму сети. Качество, обозначенное б), оценивается как пониженное качество, при котором сохраняется трафик. Качество, обозначенное в), считается неудовлетворительным и соответствует нарушению соединения.

Фазовые дрожания – кратковременные отклонения значащих моментов цифрового сигнала от их идеальных положений во времени. Если частота отклонений превышает 10 Гц, то их называют джиттером (Jitter). Если частота отклонений не превышает 10 Гц, то их называют блужданиями или вандером (Wander). На рис.5.2 представлены характеристики импульсного сигнала с изменением значащих моментов.

В современной технологии контроля получила распространение практика измерения амплитуды дрожания цифрового сигнала в единицах времени: абсолютных (микросекунды) или приведенных – единичных интервалах (Unit Interval). Одним единичным интервалом называется время, необходимое для передачи одного бита информации с заданной скоростью передачи.

Источниками тактовых сигналов в цифровых системах и сетях являются тактовые генераторы, которые подразделяются на первичный эталонный (ПЭГ), ведомый/вторичный задающий (ВЗГ), генератор сетевого элемента (ГСЭ).

Число проскальзываний, которые возникают из-за ухудшения качества синхронизации, определяется следующей формулой [22]:

Число проскальзываний за 24 часа =

$$= (\text{число секунд за сутки}) \times (\text{число циклов в секунду}) \times (\Delta f / f_0), \quad (5.1)$$

где $(\Delta f / f_0)$ – точность синхронизации.

Если длительность цикла 125 мкс, цикловая частота равна 8 кГц, число секунд в сутках – 86 400, то число проскальзываний определяется:

$$N_{\text{проск}} = 6,9 \times 10^8 \times (\Delta f / f_0). \quad (5.2)$$

Соотношение (5.2) позволяет определить связь норматива на проскальзывания и требуемую точность синхронизации. При стабильности тактового генератора 2×10^{-11} число проскальзываний в сутки составит:

$$N_{\text{проск}} = 13,8 \times 10^{-3},$$

т. е., возникнет одно проскальзывание за 72,5 суток, что соответствует требованию рекомендации G.822.

Первичный эталонный генератор (ПЭГ) – высокостабильный генератор, долговременное относительное отклонение частоты которого от номинального значения поддерживается не превышающим 1×10^{-11} при контроле по универсальному координированному времени.

Ведомый или вторичный задающий генератор (ВЗГ) – генератор, фаза которого подстраивается по входному сигналу, полученному от генератора более высокого или того же качества. ВЗГ обеспечивает, как правило, высокую кратковременную относительную стабильность частоты (около $10^{-9} \dots 10^{-11}$) и существенно более низкую относительно ПЭГ долговременную относительную стабильность (около 10^{-8}).

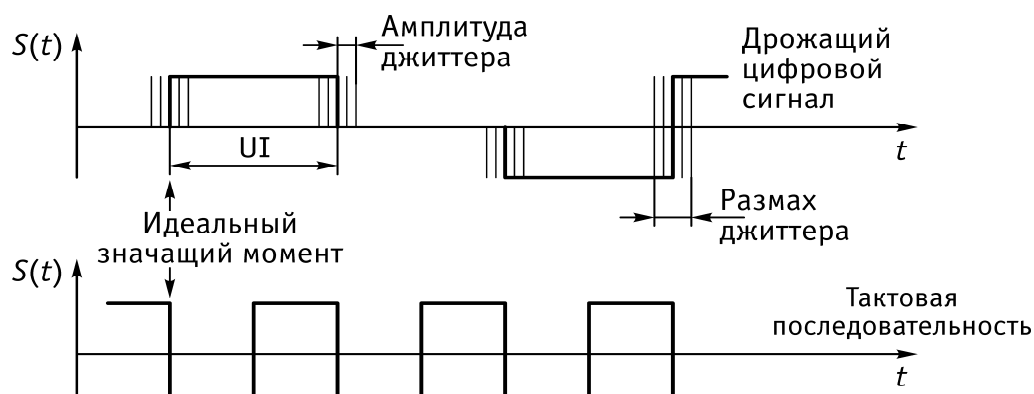


Рис. 5.2. Временные диаграммы цифрового сигнала

Генератор сетевого элемента (ГСЭ) – синхронизируемый внешним синхросигналом генератор (обычный кварцевый), помещаемый в мультиплексоры PDH, SDH, ATM, кроссовых коммутаторов и т. д. Такты ГСЭ так же подстраиваются под внешние такты, как и в ВЗГ, однако их собственная относительная долговременная стабильность не превышает 10^{-6} .

Указанные генераторы имеют следующие иерархические положения по значимости в сети синхронизации (ТСС).

1-й или высший уровень иерархии ТСС – ПЭГ (называемый нулевым).

1-й уровень иерархии ТСС-ПЭИ (первичный эталонный источник), не являющийся составной частью ТСС, например, навигационный спутник GPS или ПЭГ другой сети.

2-й уровень иерархии ТСС – ВЗГ, который представляют как транзитный или конечный и совмещаемый с узлами автоматической коммутации (УАК) и автоматическими междугородными телефонными станциями (АМТС) или цифровыми АТС.

3-й уровень иерархии ТСС – ГСЭ, к которым относятся мультиплексоры SDH, кроссовые коммутаторы SDH, оконечные цифровые АТС.

Источники тактового синхронизма могут быть включены в определенные сетевые конфигурации и различные сети ТСС.

Централизованная сеть распределения синхросигналов от единственного ПЭГ. Это *синхронная сеть*, в которой значащие моменты сигналов подстраиваются таким образом, чтобы установить синхронизм, при котором значащие моменты повторяются с некоторой средней точностью. Это принудительная синхронизированная сеть.

Совокупность централизованных подсетей, каждая из которых содержит ПЭГ. При отсутствии взаимосвязи между ПЭГ такая сеть синхронизации обеспечивает *псевдосинхронный режим* работы соответствующих цифровых подсетей.

Плезиохронный режим сети ТСС может возникнуть в цифровой сети, когда генератор ведомого узла (ВЗГ или ГСЭ) полностью теряет возможность внешней принудительной синхронизации из-за нарушения как основного, так и всех резервных путей синхронизации. В этом случае генератор переходит в режим удержания (в англоязычной литературе – *holdover*), при котором запоминается частота сети принудительной синхронизации. По мере ухода с течением времени частоты генератора из-за дрейфа от величины, зафиксированной в начальный момент в памяти, он переходит в так называемый свободный режим (в англоязычной литературе – *free-run mode*). Этот режим синхронизации уже называется *асинхронным* и характеризуется большим расхождением частот генераторов, при котором, однако, еще не нарушается процесс передачи информационной нагрузки в сети связи.

Сеть синхронизации ТСС образуется совокупностью генераторов (ПЭГ, ВЗГ, ГСЭ), системой распределения синхросигналов в узлах связи SASE (Stand Alone Synchronization Equipment – отдельное оборудование синхронизации или блоки сетевой синхронизации, БСС) и связью между ними и самими синхросигналами, которые транслируются в определенном порядке.

В качестве синхросигналов в сети ТСС могут применяться следующие сигналы: цифровой сигнал 2048 кбит/с с кодированием в троичном коде HDB-3; гармонический одночастотный сигнал с частотой 2048 кГц; гармонический одночастотный сигнал с частотой 10 МГц или 5 МГц и некоторые другие [22].

Блоки сетевой синхронизации (БСС) или SASE выполняются в соответствии с концепцией построения интегрированных сетей синхронизации BITS (Building Integrated Timing Supply). Интеграция при построении ТСС предполагает объединение транспортных сетей, сетей доступа, вторичных сетей для поддержки синхронизма. При этом сеть синхронизации должна проектироваться и создаваться как наложенная сеть.

5.3. Генераторы сигналов синхронизации

Генераторы систем синхронизации (сетей ТСС) подразделяются на два типа: атомные и кварцевые.

Атомные генераторы используют три атомных эталона: рубидий, цезий и водород. Рубидий поглощает микроволновые колебания на частоте 6 834 682 608 Гц, цезий – на частоте 9 192 631 770 Гц, водород – на частоте 1 420 405 751,768 Гц. Они используются в качестве ПЭГ.

Эталон рубидия обеспечивает стабильность частоты генератора на интервале времени $1\text{ с} - 10^{-11} \dots 10^{-12}$, $1\text{ сутки} - 10^{-12} \dots 10^{-13}$, $\text{месяц} - 10^{-11}$. Эталон рубидия требует коррекции, т.к. им присущ недостаток, обусловленный старением. Рубидиевый генератор используется в связке с GPS.

Цезиевые генераторы представляют собой первичные стандартные эталоны. В соответствии с международными соглашениями цезиевый генератор частоты определяет продолжительность времени в одну секунду. Это продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу атома цезия -133 между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия -133. Стабильность частоты генератора на интервале времени $1\text{ с} - 10^{-11} \dots 10^{-13}$, $1\text{ сутки} - 10^{-13} \dots 10^{-14}$, $\text{за год} - 10^{-13}$. Эталон не требует коррекции.

Водородный эталон – водородный мазер, обладает очень высокой стабильностью на коротких промежутках времени (несколько часов), стабильность оценивается величиной 10^{-15} . Тем не менее, он не заменяет цезиевый эталон из-за долговременного дрейфа.

Кварцевые генераторы подразделяются на три вида: обычные кварцевые, кварцевые с температурной компенсацией ТСХО (Temperature Compensated Crystal Oscillator) и охлаждаемые кварцевые источники ОСХО (Oven Compensated Crystal Oscillator). Они используются в качестве ГСЭ, ВЗГ.

Обычные кварцевые генераторы имеют стабильность в интервале времени $1\text{ с} - 10^{-9}$, $\text{в сутки} - 10^{-7}$, $\text{в год} 10^{-6}$.

Генераторы ТСХО имеют стабильность в интервале времени $1\text{ с} - 10^{-9}$, $\text{в сутки} - 10^{-8}$, $\text{в год} 10^{-7} \dots 10^{-8}$.

Генераторы ОСХО имеют стабильность в интервале времени $1\text{ с} - 10^{-9} \dots 10^{-10}$, $\text{в сутки} - 10^{-7} \dots 10^{-9}$, $\text{в год} 10^{-9} \dots 10^{-11}$.

Источники тактового синхронизма на основе GPS (Global Position System) – глобальной системы позиционирования. В основе системы лежит использование низкоорбитальных спутников системы NAVSTAR. Одновременно над горизонтом в любой точке земного шара наблюдаются минимум три спутника. На спутниках размещаются цезиевые стандарты, которые генерируют сигналы заданного вида. Особенностью синхросигнала, генерируемого приемником от GPS, является его высокая долговременная

стабильность и низкая кратковременная стабильность, которая зависит от количества спутников.

Генераторы тактового синхронизма ПЭГ и ВЗГ имеют достаточное число выходов синхросигналов. Однако для подключения синхросигналов с выходов мультиплексоров необходимо использовать аппаратуру разветвления сигналов синхронизации (АРСС). В состав АРСС входят блоки усилителей 2048 кГц, усилителей 2048 кбит/с, преобразования - передачи сигнала с одной тактовой частоты на другую.

5.4. Распределение тактового синхронизма

Распределение тактового синхронизма в цифровой сети осуществляется от базовой сети ТСС. На территории России базовую сеть синхронизации образует сеть ОАО Ростелеком. Базовая сеть представлена различными регионами синхронизации: Дальневосточный (Хабаровский), Сибирский (Новосибирский), Центральный (Московский), Южный (Ростовский), Северо-западный (С. - Петербургский). Каждый регион оснащается ПЭГ. Доставка синхросигналов от ПЭГ по основным и резервным линиям ко всей аппаратуре систем передачи и коммутации, передающейся в синхронизации, осуществляется с помощью аппаратуры PDH и SDH и по физическим линиям.

Синхронизация, передаваемая в системах SDH, - это сигнал 2 048 кбит/с с тактовой частотой, соответствующей по стабильности частоте ПЭГ. По системам PDH сигнал 2 048 кбит/с может передаваться в оба направления.

В системах SDH передача синхроинформации с помощью компонентных сигналов 2048 кбит/с не рекомендована из-за возможных значительных скачков фазы компонентных сигналов при согласовании указателей мест их расположения в линейном сигнале STM-N.

Носителем синхроинформации в системах SDH является непосредственно линейный сигнал STM-N ($N = 1, 4, 16, 64$).

При распределении тактового синхронизма внутри регионов используется принцип принудительной иерархической синхронизации (ведущий – ведомый) от ПЭГ к генераторам сетевых элементов аппаратуры SDH, АМТС и т.д. Базовая сеть ТСС обеспечивается резервированием синхросигналов, которая создается как резервными генераторами и взаимным резервированием регионов, так и маршрутами доставки синхроинформации.

Для синхронизации сетей различных операторов предложено четыре класса присоединения к базовой сети синхронизации (рис. 5.3)[22]:

- 1-й класс – сеть оператора получает сигнал синхронизации через пассивные соединительные линии от ПЭГ базовой сети ТСС;
- 2-й класс – сеть оператора получает сигнал синхронизации от ВЗГ;
- 3-й и 4-й классы – сеть оператора получает сигнал синхронизации от ГСЭ.

Внутри каждого региона сеть принудительной синхронизации должна строиться по иерархическому принципу в виде древовидной схемы (радиально-узловой), исключающей возможность образования петель синхронизации в любой ситуации. В качестве ведомых генераторов на АМТС, АТС и т.д. могут использоваться блоки, встроенные в аппаратуру коммутации. На узлах и станциях, на которых кроме АМТС, АТС и т.д. установлено другое оборудование, нуждающееся в синхронизации (аппаратура кроссирования, оперативного переключения и т.д.), в качестве ведомых генераторов, которые синхронизируют все оборудование на данном узле, должны использоваться выделенные ведомые задающие генераторы, соответствующие рекомендации МСЭ -Т G.812. При этом каждый ВЗГ должен иметь альтернативные входы синхронизации.

На магистральной сети SDH для фильтрации фазовых дрожаний через n ($n \leq 20$) промежуточных генераторов ГСЭ также должны устанавливаться ВЗГ, соответствующие рекомендации МСЭ-Т G.812. Это обусловлено накоплением фазовых дрожаний. Для оценки искажения амплитуды джиттера в регенераторах рекомендовано использовать формулу [22]:

$$A_N = A \times \sqrt[4]{N},$$

где A – амплитуда дрожания на выходе одного регенератора; N – число последовательно включаемых регенераторов. При $N = 20$, амплитуда увеличивается в 2,11 раза.

Максимальное число ВЗГ в пределах региона в одной цепи синхронизации не должно превышать 10. ВЗГ могут отличаться собственной стабильностью тактовой частоты и полосой частот захвата внешнего синхронизма. Указанные числа для ВЗГ и ГСЭ в цепочке синхронизации практически трудно выполнить [22].

Городские транспортные сети должны синхронизироваться от генератора АМТС или от ВЗГ. При этом в качестве резервной выбирается одна из коммутационных станций, например, АТС. При районированной ГТС с узлами входящих и исходящих сообщений синхронизация всех станций узлового района осуществляется от АМТС по трактам первого выбора. Резервными ведущими станциями каждого узлового района является узел и одна из РАТС. На этих станциях устанавливаются блоки сетевой синхронизации с альтернативными входами синхросигналов. Сельская телефонная сеть должна синхронизироваться от генератора АМТС.

Учитывая, что ВЗГ и ГСЭ имеют несколько входов для внешних синхросигналов, качество которых может быть независимым по происхождению и одинаковым, вводится *система приоритетов*. Приоритет определяется его номером. Чем меньше номер, тем выше приоритет. Число приоритетов может быть от 0 до 254. Приоритет отмечается в таблице памяти контроллера ВЗГ и ГСЭ.

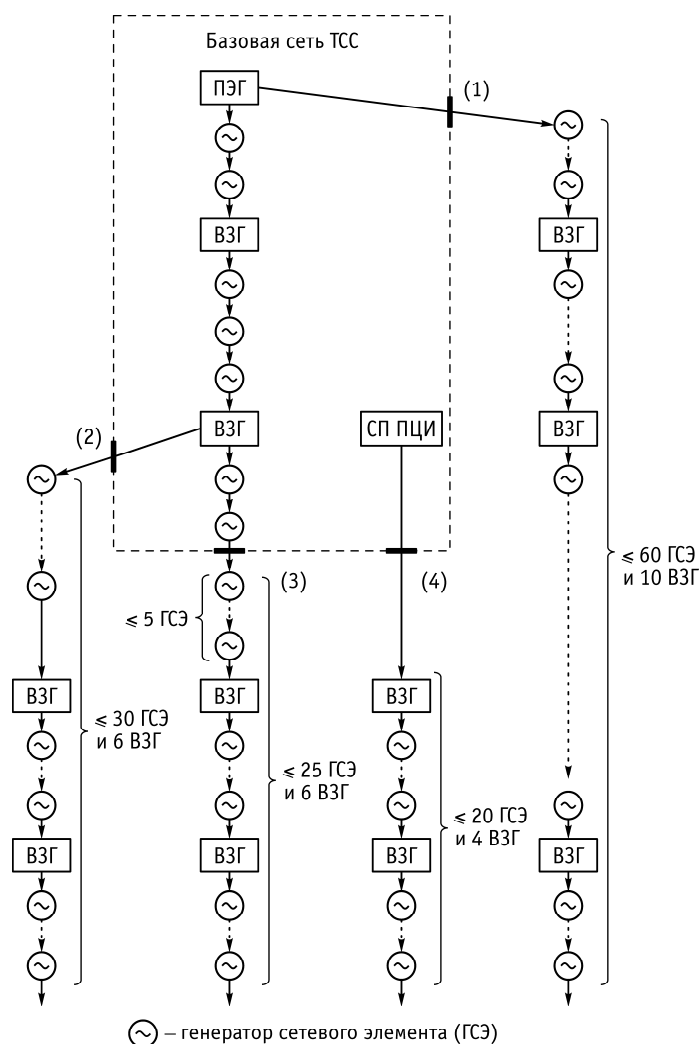


Рис. 5.3. Схема присоединения сетей операторов к базовой сети синхронизации

Первым приоритетом обычно устанавливается сигнал синхронизации, поступающий от ПЭГ по самому короткому и качественному маршруту, где по пути следования синхросигнала установлено как можно меньше промежуточных ВЗГ.

Вторым приоритетом для основного оборудования узла или станции может служить сигнал синхронизации, поступающий от ПЭГ по другому маршруту, чем сигнал первого приоритета.

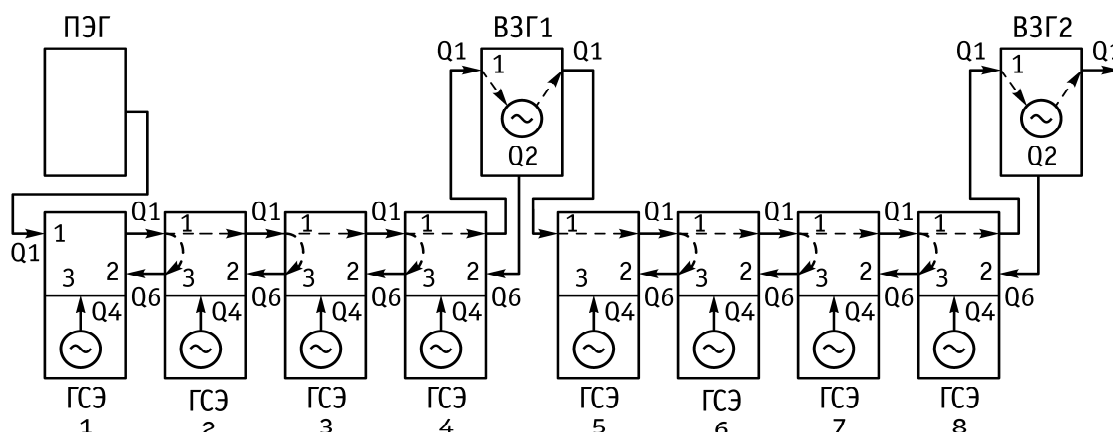
ВЗГ и ГСЭ могут принимать синхросигналы 3-го и 4-го приоритетов и т.д. Последним из приоритетов в любом оборудовании синхронизации является собственный генератор, работающий в режиме запоминания частоты синхросигнала (holdover) и свободных колебаний (free run). Приоритетом можно запретить использование входа синхронизации!

Качество синхросигнала отмечается в маркере, который может передаваться четырьмя битами в канальном интервале КИ0 цифрового потока E1(2048кбит/с) или в байте S1 заголовка MSON STM-N (табл. 5.1). Параметр Q может иметь несколько версий обозначения, что в качестве примера указано в последней колонке в скобках. Также посылки маркерных сигналов предусмотрены в отдельных пакетах Ethernet при построении сети EoT согласно рекомендации G.8261.

На рис. 5.4 и 5.5 приведены примеры использования показателей качества и приоритетов в линейной и кольцевой транспортных сетях.

На рис 5.4 разрыв замкнутой цепи синхронизации обеспечен в узле Б, где входящий сигнал STM-N несет информацию Q6, т.е. запрет на использование линейного сигнала для синхронизации узла. Кроме того, этому входу синхронизма присвоен последний приоритет использования после собственного задающего генератора ГСЭ.

Таблица 5.1. Значения маркера показателя качества



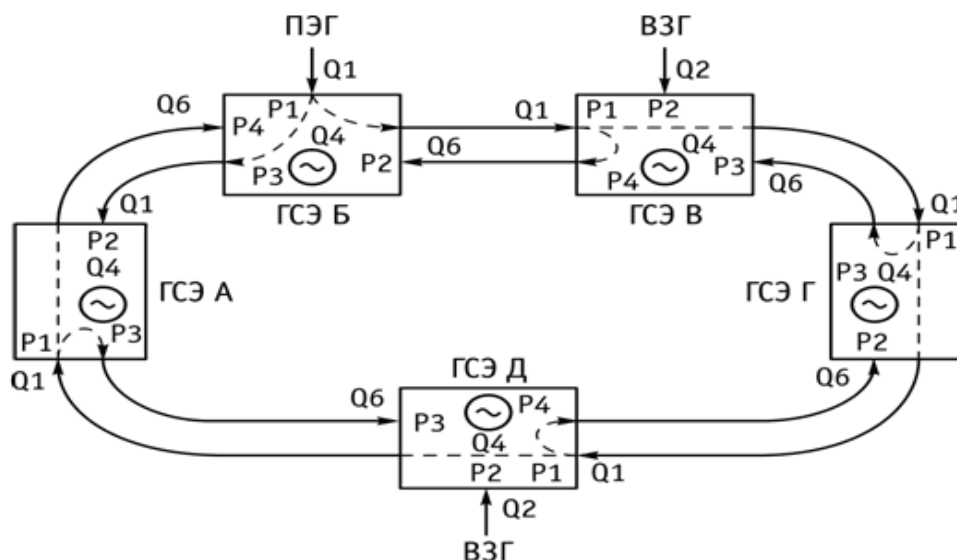


Рис. 5.5. Схема распределения тактового синхронизма в кольцевой сети

В схемах аппаратуры синхронизации и в блоках синхронизации сетевых элементов принята единая система обозначения сигналов синхронизации:

- T_0 , внутренний синхросигнал, формируемый ГСЭ для синхронизации исходящих потоков цифровых данных (E1, STM-N и т.д.);
- T_1 , синхросигналы, передаваемые в потоках линейных сигналов;
- T_2 , компонентный сигнал, используемый для синхронизации сетевого элемента (чаще всего это 2048 кбит/с, 64 кбит/с, 8 кбит/с, также возможно использование сигналов Ethernet 10 Мбит/с, 100 Мбит/с и 1000 Мбит/с согласно рекомендации G.781);
- T_3 , синхросигнал от внешнего входа 2048 МГц/2048 кбит/с в ГСЭ и ВЗГ;
- T_4 , синхросигнал на выходе из ГСЭ или ВЗГ 2048 МГц/2048 кбит.

Приведённые обозначения могут использоваться при разработке схем сетей синхронизации наряду с показателями качества и приоритетами.

В составе аппаратуры сетевого элемента и ВЗГ может использоваться буфер ретайминга, через который пропускается информационный сигнал E1 из сети SDH (PDH), для восстановления стабильности фаз фронта и среза импульсов синхронизации. Такой компонентный сигнал может использоваться для синхронизации других сетевых элементов, включаемых в цепь передачи этого сигнала.

Дополнительным и актуальным направлением развития сети синхронизации является синхронизация пакетной передачи, которая подробно представлена рядом рекомендаций МСЭ-Т: G.8261 Аспекты хронирования и синхронизации в пакетных сетях; G.8261.1 Сетевые пределы изменения задержки пакета, применимые к методам на основе пакетов (синхронизация по частоте); G.8262 Характеристики хронирования ведомых тактовых генераторов оборудования синхронного Ethernet; G.8264 Distribution of timing information through packet networks и др. (см. www.itu.int серия рекомендаций G.8xxx).

5.5. Порядок разработки схемы сети тактовой синхронизации

Перед разработкой схемы синхронизации необходимо усвоить следующее.

Каждый узел сети синхронизации обычно использует только один сигнал синхронизации, который затем может быть распределен между оборудованием внутри станции, начиная с точки получения синхронизации по схеме "звезда" без трансляций синхронизма в цепочке внутри узла. С этой целью рекомендуется использовать сигнал 2 048 кбит/с (2 048 кГц). На больших узлах необходимо использовать дополнительную аппаратуру разветвления синхросигналов (АРСС). Каждый узел должен иметь основной и резервные источники синхронизма. Если в случае отказа узел не может получать сигнал синхронизации ни по основному, ни по резервному маршруту, то необходимо в узле установить генератор горячего резерва (ВЗГ).

При проектировании для каждого сетевого элемента индивидуально должны быть определены установки порогов качества и приоритетов.

В связи с необходимостью обеспечения высокой надежности оборудования ТСС рекомендуется применять следующие меры: резервировать электропитание и все блоки ПЭГ, ВЗГ, ГСЭ, интерфейсы; резервировать все пути доставки синхросигналов к сетевым элементам.

Основой при разработке схемы тактовой синхронизации сети является детальная схема организации транспортной сети. При проектировании схемы синхронизации должно быть обеспечено согласование оборудования ПЭГ, ВЗГ, ГСЭ. Направление распределения синхросигналов должно быть указано стрелками в схеме синхронизации. *На входах оборудования, предназначенного для принудительной синхронизации, должны быть указаны уровни качества ($Q1-Q6$), обозначены входы (T_1-T_3) и приоритеты ($P1-P15$ и т.д.) использования приходящих сигналов.*

Транспортные сети часто строятся в виде колец и цепей. Планирование синхронизации кольца и цепей должно выполняться отдельно, т.к. в кольцах планируются механизмы самовосстановления. При этом для колец желательно иметь два ВЗГ.

Множественно-кольцевые сети необходимо разделять на несколько самовосстанавливающихся подсетей. Внутри каждой подсети синхронизация реализуется относительно просто. Возможно создание специальных колец распределения синхросигналов.

В линейной цепи распределения синхронизма также рекомендуется планировать два ВЗГ для поддержки устойчивой синхронизации в случае нарушений в линии или в источниках синхросигналов.

Узел для установки ПЭГ должен быть определен оптимально, т.е. так, чтобы поддержать передачу синхросигналов к узлам по «дереву» через минимальное число секций. В большинстве случаев ведущий узел определяется оператором сети. Если это не сделано, то выбор ведущего узла должен делать проектировщик. При этом критериями выбора могут быть: минимальное число иерархических уровней, равномерно сбалансированное «дерево» (с примерно

одинаковым числом элементов в ветвях), максимально возможное число элементов на первом уровне иерархии.

Для наглядной интерпретации схемы синхронизации полезно составить иерархическую диаграмму сложной сети. При этом представлении относительно легко определяются узлы, которые не имеют резервных путей передачи синхросигнала. В зависимости от требуемого уровня надежности в таких узлах может потребоваться установка дополнительных резервных источников.

Иерархическая диаграмма поможет обнаружить петли синхронизации. Важное правило при исключении петель состоит в том, чтобы сигнал всегда шел с верхнего уровня на нижний в направлении стрелок (как для основных, так и для резервных путей). Пример иерархической диаграммы приведен на рис.5.6. Целесообразно проводить проверку разработанных схем путем моделирования отказов при тестировании фрагментов сети ТСС.

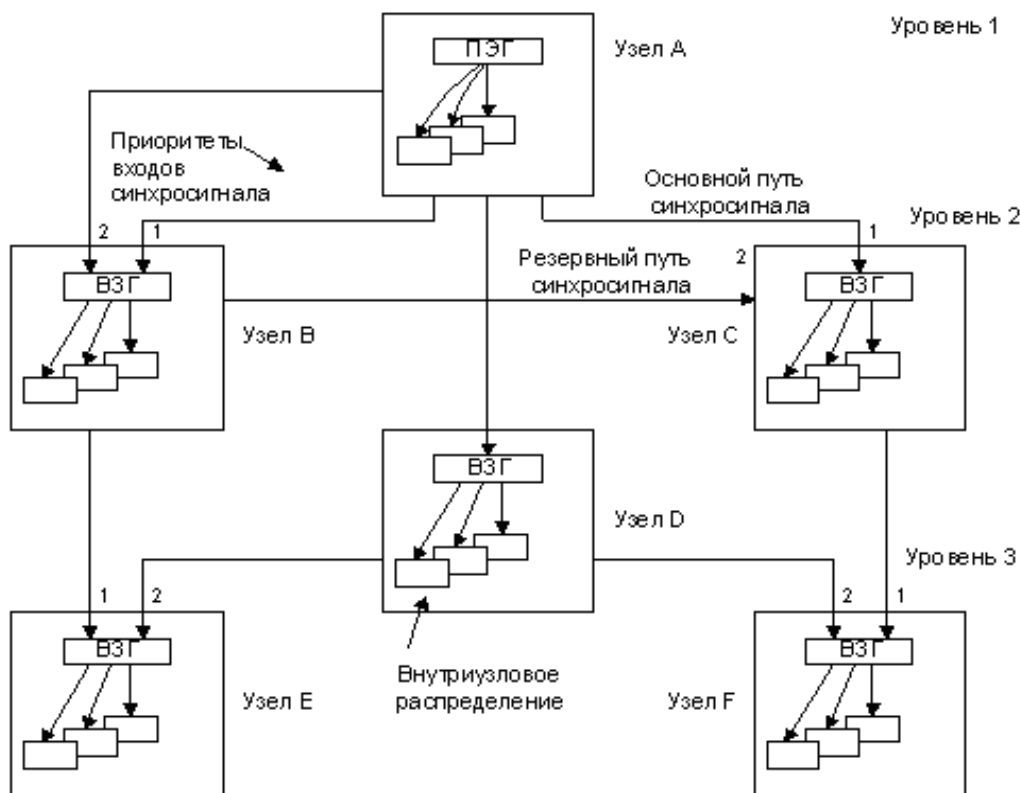


Рис. 5.6. Схема межузловой синхронизации

Кроме того, необходимо учитывать уже существующий опыт проектирования ТСС [22]. В частности, число ГСЭ в одной цепи не должно превышать 10 -15 между ВЗГ. Общее число ГСЭ вместе с ВЗГ не должно быть более 45 (вместо 60 по стандарту). При этом рекомендуется число ВЗГ устанавливать не более 6 -7 (вместо 10 по стандарту).

5.6. Общие принципы управления в оптической мультисервисной транспортной сети

Одной из основополагающих моделей в сфере управления сетями телекоммуникаций является модель Сети Управления Телекоммуникациями TMN (Telecommunication Management Network), которая подробно представлена в рекомендациях МСЭ-Т серии М.3000-М.3100.

Согласно определению, TMN представляет собой отдельную сеть, которая имеет интерфейсы с одной или большим числом сетей связи в нескольких точках (интерфейсах), обменивается с этими сетями информацией и управляет их функционированием. Отделение TMN от сетей связи реализуется на физическом или логическом уровне в различных интерфейсах. Сеть TMN может частично использовать инфраструктуру управляемой сети, например, встроенные каналы передачи данных, коммутаторы и маршрутизаторы управляемой сети.

В спецификациях TMN управляемые ресурсы имеют общее название сетевые элементы (СЭ) или NE (Network Element). Функции управления возложены на системы поддержки операций OSS (Operations Support System) или операционные системы управления.

Функции управления оптической мультисервисной транспортной сетью согласно TMN, состоят в следующем:

- конфигурирование СЭ;
- установка параметров электрических и оптических интерфейсов в СЭ;
- коммутация кроссовых соединений в мультиплексорах;
- переключение на резерв оптических секций, оптических и цифровых трактов, соединений подсетей и оборудования;
- конфигурирование сети тактовой синхронизации;
- конфигурирование каналов передачи данных для сети управления (СУ);
- обработка аварийных сигналов;
- контроль функционирования.

Конфигурирование СЭ предполагает выполнение ряда операций:

- базовое конфигурирование сетевого элемента с пустой базой данных;
- резервирование и восстановление конфигурации;
- запрос данных конфигурации по позициям сетевого элемента (тип полки, список оборудования, назначение смежных блоков, точки окончания, тактирование, выдача аварийных сигналов, каналы передачи данных управления);
- конфигурирование тактовых генераторов;
- конфигурирование входов дистанционного контроля;
- считывание состояния программного обеспечения и т.д.

Установка параметров порта (интерфейса) на СЭ подразумевает установку состояний оптических и электрических интерфейсов, интерфейсов внешней синхронизации и др.

Коммутация кроссовых соединений в СЭ может быть выполнена между отдельными электрическими и оптическими интерфейсами. Для контроля качества сигнала на установленном кроссовом соединении могут использоваться точки окончания или транзитного соединения.

Кроссовые соединения выполняются после полной конфигурации СЭ за исключением кроссовых СЭ. При кроссировании устанавливаются однонаправленные соединения «точка-точка», однонаправленные «точка - много точек», двунаправленные. Отмечаются точки окончания, метки сигналов, контроль транзитных соединений.

Переключение на резерв в СЭ, которое предусматривается в оборудовании, выполняется с целью повышения надежности сетевого элемента и сети связи. При нарушении передачи, например, при обрыве линии (по сигналу LOS) или повышенном коэффициенте ошибок, должно быть выполнено переключение сигналов на резервную линию. Дополнительное оборудование в составе СЭ может сохранить трафик в результате защитного переключения. Процедуры управления определены относительно установки резервирования, удаления резервирования, запроса конфигурации и данных о состоянии для существующих решений по резерву, изменений конфигураций резервирования, переключений между рабочими и резервными секциями мультиплексирования или сменными блоками в оборудовании. Резервирование секций и блоков может быть полным (1+1) или частным (1:n), где n – рабочих секций или блоков и 1 резервная секция или блок.

Конфигурирование тактовой синхронизации предполагает:

- конфигурирование источников синхронизации СЭ и сети;
- конфигурирование тактовых сигналов;
- конфигурирование внешнего тактового сигнала синхронизации.

Конфигурирование производится по показателям качества и приоритетам. Очередность приоритетов устанавливается программно в каждом СЭ.

Признаком переключения синхросигналов по приоритету могут служить:

- потеря сигнала (LOS);
- потеря цикла (кадра) передачи (LOF);
- сигнал индикации аварии (AIS).

Для защитных переключений источников синхронизации предусмотрен таймер восстановления синхронизма (от 1 до 60 минут), который возвращает схему синхронизма после срабатывания в исходное положение.

Конфигурирование сети передачи данных DCN (Data Communication Network), которая может создаваться на основе встроенных каналов, выполняется для обеспечения надежности передачи данных СУ. При этом конфигурировании создаются форматы адресов области (домена) управления и дополнительные адреса СЭ.

Обработка аварийных сигналов предполагает различные виды отображения аварий. Аварии индицируются в аппаратуре сетевого элемента светодиодами на панели состояний AIP (Alarm Interface Panel). Аварийные

сигналы как уведомления отправляются СУ оператору для идентификации срочности и важности на экране монитора.

В базе данных СУ от СЭ может фиксироваться степень серьезности аварии, список аварийных сигналов, производится фильтрация аварийных сигналов, подсчитывается число возникших аварийных сигналов, фиксируются время аварий и т.д.

Контроль функционирования РМ (Performance Monitoring) позволяет оператору СУ следить за качеством работы конкретного СЭ транспортной сети.

В СУ достигается непрерывность сбора статистической информации с последующей аналитической обработкой. Для этого автоматически производится активизация точек контроля или измерений параметров функционирования, опрос этих точек и деактивация.

Контроль функционирования периодичен и информация фиксируется в базе данных MIB (Management Information Base – база данных управляющей информации) через 15 минут или 24 часа (контроль и фиксация возможны также каждый час, каждые 30 и 45 минут).

5.7. Системы управления оптическими мультисервисными транспортными сетями

Для эффективного управления оптическими сетями связи все поставщики оборудования (мультиплексоров и транспортных платформ) предлагают использование современных средств программного управления, встраиваемого непосредственно в оборудование и в серверные устройства. Совокупность этих средств и устройств управления и каналов передачи данных получила название **системы управления**. Программные средства разрабатываются для каждого уровня управления (управление СЭ, управления транспортной сетью, управления услугами транспортной сети) и подразделяются на программы «менеджера» и «агента» управления. Программы «менеджера» размещаются в серверах управления. Программы «агента» размещаются в СЭ.

На **уровне управления сетевых элементов** EML (Element Manager Layer), предназначенном для поддержки работы оборудования, управления загрузкой программного обеспечения, централизованного менеджмента ошибок и сбора данных контроля и измерения характеристик оборудования и сети, используются прямые взаимодействия «агент-менеджер».

Например, «Менеджер» Alcatel 1353 SH управляет всеми оптическими сетевыми элементами: SDH, DWDM, ATM, IP и любыми транспортными сетями: подводными и наземными, включая проводные и беспроводные системы, может осуществлять управление более чем 100 типами и версиями сетевых элементов. При этом поддерживаются любые интерфейсы управления: Q3/CMIP, SNMP, TL1, CORBA. Для сетей простой конфигурации могут использоваться локальные терминалы управления, например, 1320NX или 1320CT (рис.5.7.).



Рис. 5.7. Пример подключения терминала управления 1320СТ к мультиплексу SDH через интерфейс Q3

На уровне **управления транспортной сетью** NML (Network Management Layer) используются интегрированные системы, предназначенные для организации и управления трактами, организуемыми внутри сети (от точки до точки) для внешних клиентов, а также управления сетью в целом. Выполняет все функции, включая такие, как создание, инвентаризация и обслуживание трактов, проведение необходимых расчетов, контроль их качественных характеристик (provisioning, inventory, maintenance, accounting and quality) и т.п.

На уровне NML реализуется ряд возможностей по:

- дистанционному наблюдению и контролю транспортных сетей;
- профилактическому обслуживанию, обнаружению и локализации неполадок для оказания поддержки обслуживающему персоналу;
- централизованному управлению трактов при комплексном учете топологии сети;
- управлению данными, увязанными с контролем качества предоставляемых услуг;
- управлению данными, увязанными с инвентаризацией состояния сети с целью планирования дальнейших работ;
- информации, связанной с предоставлением сетевых услуг;
- оптимизации капиталовложений на основе использования технологий, допускающих возможность модернизации, а также гибкой и масштабируемой архитектуры сети. Примером такой *системы управления* может служить Alcatel 1354RM.

Системы управления уровня услуг SML (Service Management Layer) обеспечивают специалистам по планированию и реализации сетей широкий спектр возможностей для определения типа и конфигурации оптической мультисервисной платформы и сетевых топологий. Эти системы получают информацию от систем управления сетью для расчета соединения под услуги пользователю. Они могут формировать запросы ниже лежащим системам сетевого управления по расширению возможностей оптической сети (виртуальной сцепке контейнеров VC-х или блоков OPUk, наращиванию числа оптических каналов). На уровне управления услугами создается весь набор операторского класса, который необходим для создания транспортной сети,

конфигурирования услуг и наблюдения за арендуемыми линиями передачи, услугами виртуальных частных сетей VPN с различным уровнем качества QoS.

Наиболее «продвинутые», развитые системы управления способны обеспечить операции по планированию и проектированию оптической мультисервисной транспортной сети. К таким системам управления относятся, например, Cisco Transport Planner и Cisco Metro Planner – комплексный инструмент проектирования сетей DWDM и изменения существующих проектов на основе платформ ONS15454 с интегрированной технологией ROADM.

Современные системы управления ряда производителей, в частности Huawei, поддерживают концепцию управления ASON (Automatic Switched Optical Network – автоматически коммутируемая оптическая сеть), что позволяет ускорить процессы выделения ресурсов транспортных сетей потребителям. Однако вновь появившиеся осложнения с управлением транспортными сетями потребовали принятия новых решений для подготовки сетей к переносу динамически меняющегося трафика больших скоростей (терабитового диапазона). Таким решением стала разработка программно конфигурируемых сетей.

5.8. Технология T-SDN – перспективное решение управления оптическими сетями

Стремительный рост и распространение широкого спектра телекоммуникационных услуг, их виртуализации в облачных решениях стали предпосылкой для переосмысления типовых сетевых структур с делением на транспортные, доступа и т.д. Это коснулось, прежде всего, согласованного управления ресурсами и услугами. Появился ещё один важнейший тренд развития телекоммуникаций, сформулированный в 2005 году в университетах Беркли и Стенфорда, как программно-конфигурируемые сети SDN, Software Defined Networking. Изначально решение SDN ориентировано на сети с поддержкой множества услуг на так называемом низовом уровне коммутаторов и маршрутизаторов с использованием протокола OpenFlow [81]. Однако, как показало бурное совершенствование оптических сетей, и на уровне высокоскоростного оптического транспорта требуется применение технологий гибкого динамического и быстрого выделения запрашиваемых ресурсов под конкретные услуги. Не смотря на наличие технологии автоматизированных коммутируемых оптических сетей ASON, разработанной и стандартизированной ITU-T в первом десятилетии 21 века осталась недостаточно решенной задача обеспечения ресурсами транспортных сетей динамически меняющихся запросов от сетей услуг. По этой причине ITU-T в своих исследовательских комиссиях приступил к разработке дополнительных стандартов с общим названием T-SDN (transport software-defined networks). Ниже приводится краткий обзор основных идей вновь создаваемой технологии

управления оптическими системами и сетями, поддерживающими терабитные и петабитные скорости передачи в оптических сетях пятого поколения.

5.8.1. Общая характеристика программно-конфигурируемых сетей SDN

Смысловое содержание по существу новой технологии SDN состоит в создании программного обеспечения для существующих и планируемых сетей, которое позволило бы на практике решать проблемы централизованного управления оборудованием разных производителей, снижать сложности настройки и конфигурирование сети, поддерживать динамические изменения в реальном времени для вновь создаваемых или запрашиваемых сервисов, сделать более безопасной и устойчивой работу сети, детально контролировать сеть для служб поддержки сервисов, собирать, обрабатывать и хранить статистики сети и её управления.

Технологией SDN предусматривается трёхуровневая структура (рис.5.8): прикладной уровень или уровень SDN; уровень контроллера и передачи данных; инфраструктурный уровень или физическая сеть. Составной частью технологии SDN является протокол OpenFlow, предназначенный для управления маршрутизацией и коммутацией в сети, т.о. выполняющий функцию связующего звена между уровнями.

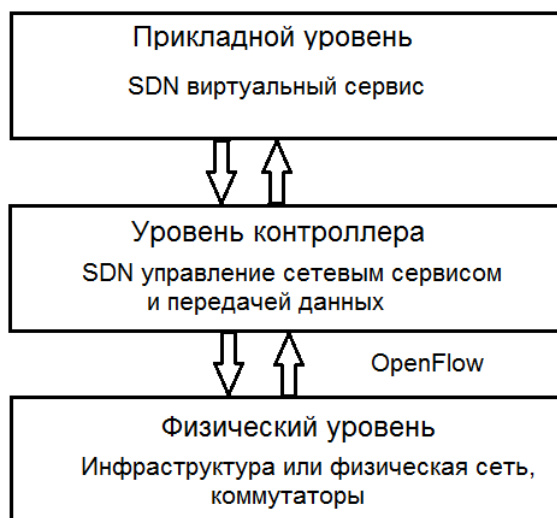


Рис. 5.8. Уровневая структура SDN

Этот протокол позволяет специалистам тратить меньше времени на настройки сети для поддержки заданных показателей качества QoS. Благодаря этому протоколу возможна организация управления всеми коммутаторами и маршрутизаторами сети под единой сетевой операционной системой, отслеживающей конфигурацию сети. Результативность протокола обоснована поддержкой потока данных таблиц, содержащих множество flow таблиц (также термин абстракцией таблиц), объединяемых в древовидные структуры. Протокол решает проблему зависимости от сетевого оборудования различных

поставщиков, т.к. использует общие абстракции для посылки пакетов от сетевой операционной системы к коммутаторам.

В обычном маршрутизаторе или коммутаторе быстрая переадресация и решения по маршрутизации высокого уровня происходят в одном устройстве. Протоколом OpenFlow производится разделение двух функций. Пересылку данных пакетами выполняет коммутатор, а решения по маршрутизации принимает отдельный контроллер или стандартный сервер. Таблица содержит набор полей пакета, сверяемых с входящими пакетами, и набор действия с пакетами (порт, куда послать, модифицировать поле, отбросить и т.д.). Если поступают пакеты, которые не идентифицированы таблицей, то они пересылаются контроллеру (серверу) для принятия решения по их обработке (добавить запись маршрутизации, переадресовать и т.д.).

5.8.2. Программно-конфигурируемые оптические сети T-SDN

Необходимость применения технологии T-SDN на оптических транспортных сетях обусловлена следующими показателями: необходимостью управления услугами многоуровневой структуры мультисервисной оптической сети (уровни L0, L1, L2, L3) (рис. 5.9.); гибким резервированием полосы для транспортных соединений (статическое и динамическое); поддержки взаимодействия между центрами обработки данных (ЦОД) по пропуску сверхбольших объёмов данных; автоматическое конфигурирование транспортной сети по запросу; защита соединений в сети на различных уровнях; многоуровневая оптимизация и управление; поддержка оборудования различных производителей (мультивендорность); сохранение (не увеличение) капитальных затрат (CAPEX) и сокращение затрат на эксплуатацию (OPEX). Технология T-SDN рассматривается разработчиками оптимальным решением по управлению между централизованным и распределённым управлением по критерию качества обеспечиваемых услуг QoS.

Технология T-SDN должна существенно повысить гибкость в управлении всеми уровнями оптической сети, включая оптические и электрические (L0, L1 – оптические и L2 - L3 – электрические). В оптической части это касается управления мультиплексорами ROADM, независимых от длин волн оптических сигналов, направления их распространения и их нагрузки (термин CDC, colorless-directionless-contentionless). Также в оптической части требуется поддерживать режимы организации оптических каналов «flex grid» и «super-channels» для когерентных и некогерентных решений на скорости передачи до 400 Гбит/с и более. При этом должна поддерживаться адаптация скорости под разные форматы модуляции (QPSK, 8QAM, 16QAM, PM-, ...) с учётом отношения OSNR, возможностей FEC, дистанции передачи и т.д. Поддержка коммутационных возможностей на уровне оптических волн λ_i (каналов), электрических каналов (ODUk, ODUk-Xv, ODUflex), пакетов (Ethernet, TP-MPLS), защитной коммутации (50 - 200 мс) также обязательны для T-SDN. В вычислительны возможности по маршрутизации должны закладываться

функции grooming, т.е. оптимальное построение маршрутов оптических каналов. Где критерием оптимальности может служить отношение OSNR и наикротчайший путь. Функционально grooming позволяет динамически распределять ресурсы волн на всех участках оптической сети и нагрузки.

В чём состоят отличия традиционной архитектуры оптической транспортной сети от архитектуры с технологией T-SDN?

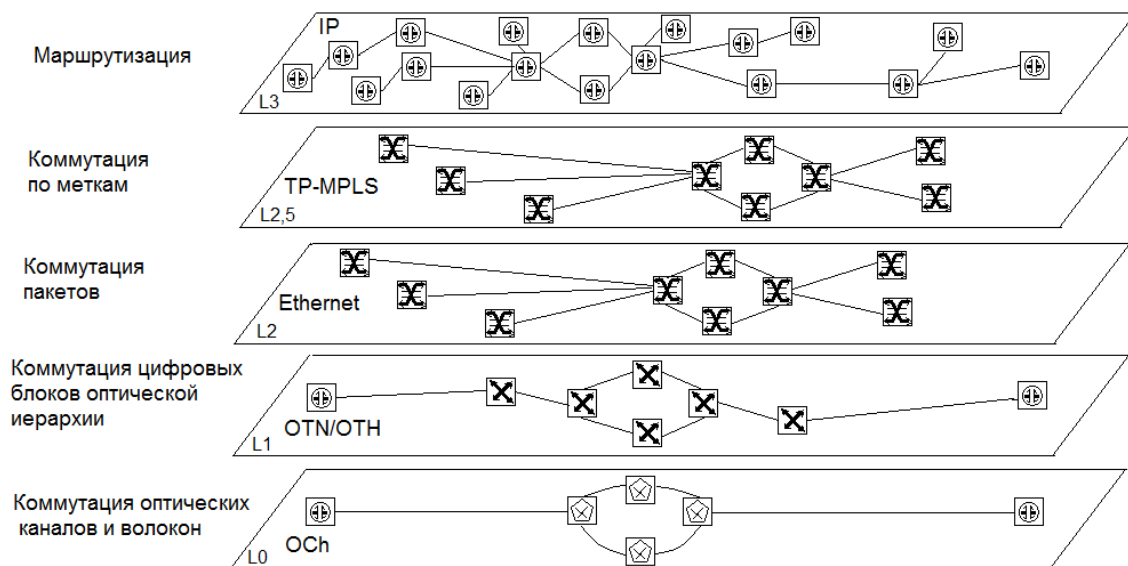


Рис. 5.9. Структура мультисервисной оптической транспортной сети

Принципиальные элементы отличия этих архитектур представлены на рис.5.10.

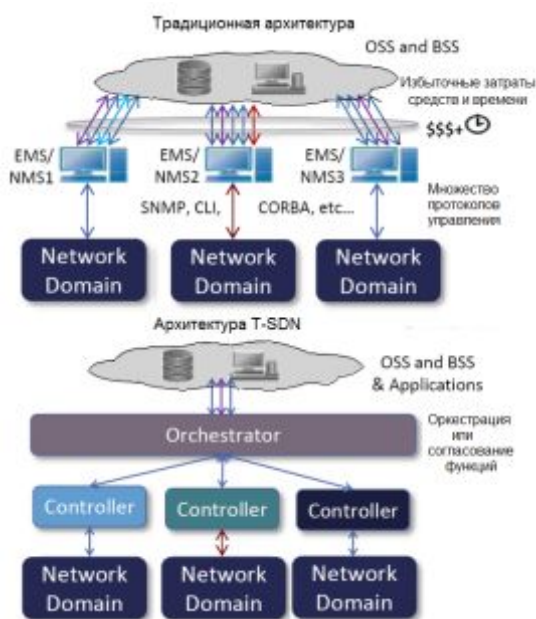


Рис. 5.10. Организация управления в различных архитектурных решениях

В традиционной архитектуре каждый сетевой домен (Network Domain) имеет свою систему управления с набором протоколов управления сетевыми элементами EMS (element management system) и сетью NMS (network management system), которые не всегда совместимы с другими доменами и их системами управления на базе протоколов SNMP, CLI, CORBA, TELNET и другими. Такая проблема приводит к дополнительным затратам на поддержку различных систем управления и согласования между ними по средствам человека-оператора, что замедляет процесс предоставления ресурсов транспортной сети пользователю и вызывает простой этого ресурса. Традиционная архитектура тормозит развитие операционных возможностей (OSS, operations support system) и расширение спектра услуг, приносящего доходы оператору (BSS, business support system).

В архитектуре T-SDN контроллеры управления действуют согласованно через структуру сложного программного продукта, называемого оркестратором, и налаживают взаимодействие автоматически без участия человека-оператора, что экономит время на решение задач OSS, BSS и взаимодействия с приложениями (Applications) по программируемым прикладным интерфейсам (API, application programming interfaces) и услугам. Создаётся открытая платформа для дальнейшего наращивания операторских и бизнес возможностей. Один из таких примеров продемонстрировала компания Telefonika (рис.5.11.).

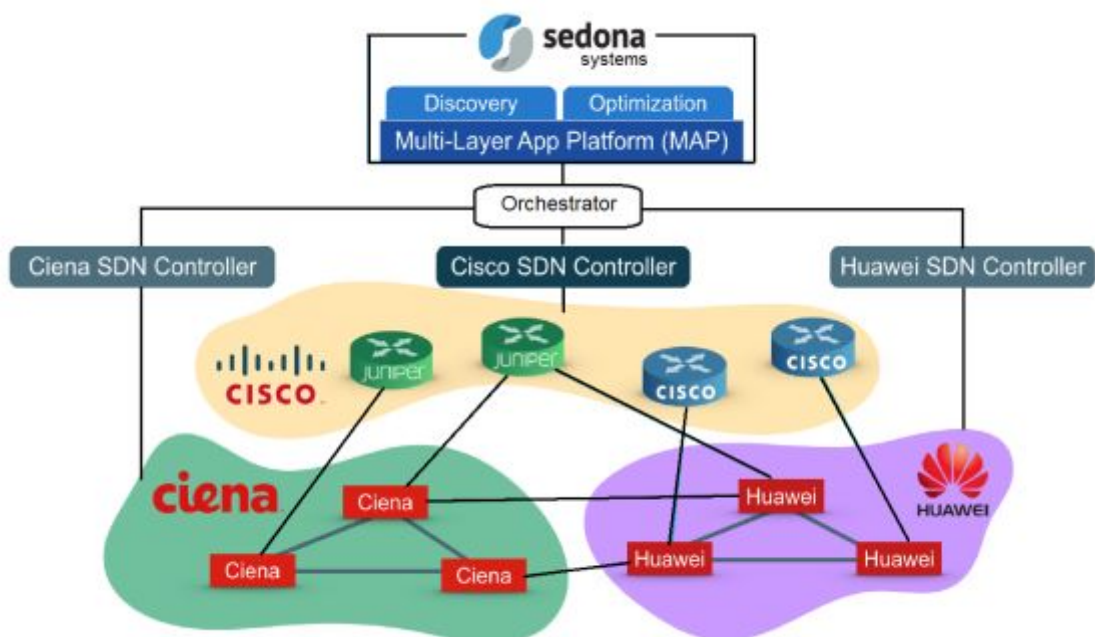


Рис. 5.11.Пример структуры экспериментальной сети SDN компании Telefonika

На рис.5.12 представлен пример организации управления в транспортной сети для уровней 2, 3 средствами T-SDN, где обозначено:

VRF, Virtual Routing and Forwarding – виртуальная маршрутизация и отправление;

VPN, Virtual Private Network – виртуальная частная сеть;

PW-LSP, Pseudowire Label Switched Path – псевдо соединение коммутируемого пути по метке;

VLAN, Virtual Local Area Network – виртуальная локальная сеть.

В нарождающейся технологии T-SDN есть ещё ряд проблем, которые подлежат разрешению на стадии стандартизации, например, установление взаимодействия с сетями ASON, выделения каналов передачи данных для взаимодействия сетевого домена и контроллера T-SDN и оркестратора с контроллером, поддержка сквозных функций защиты соединений на различных уровнях транспортной сети и распределения сервиса, и т.д.

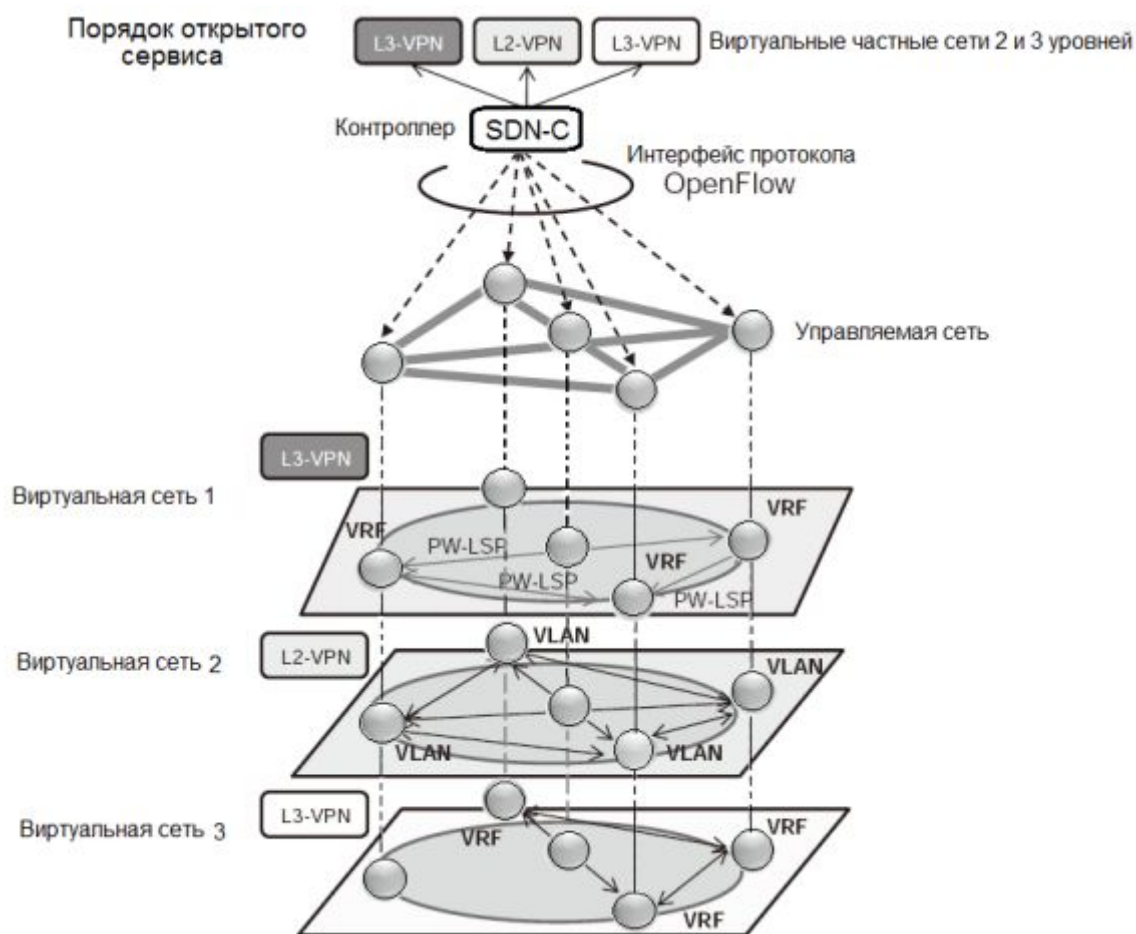


Рис. 5.12. Пример структуры сети T-SDN с управлением на пакетных уровнях

Архитектурные решения для транспортных сетей с T-SDN стали предметом стандартизации ITU-T в рекомендациях G.7701(11.2016) Common control aspects и G.7702 (03.2018) Architecture for SDN control of transport networks.

Контрольные вопросы

1. Чем определены правила построения сетей тактовой синхронизации и управления?
2. В чем заключаются проблемы ТСС?
3. Что называют проскальзываниями?
4. В чём сущность нормирования проскальзываний?
5. Что называют джиттером и вандером?
6. Как связано число проскальзываний со стабильностью тактовых генераторов?
7. Какая сеть синхронизации называется централизованной?
8. Чем отличаются ПЭГ, ВЗГ и ГСЭ?
9. Что обозначает плезиохронный режим работы в сети ТСС?
10. По каким правилам должен распределяться тактовый синхронизм внутри узла и между узлами связи?
11. Чем различаются классы подключения к базовой сети синхронизации?
12. Что представляет собой система приоритетов синхронизации?
13. Что представляет собой система показателей качества синхронизации?
14. Как сочетается использование системы показателей качества и приоритетов в сети синхронизации?
15. Как обозначают синхросигналы внутри аппаратуры?
16. Каков порядок разработки схемы синхронизации транспортной сети?
17. В чем состоят функции управления оптической мультисервисной транспортной сетью?
18. Что представляет собой система управления транспортной сетью?
19. Что обозначает SDN?
20. Чем обусловлено появление концепции SDN?
21. Что входит в структуру SDN?
22. Какое назначение имеет протокол Open Flow?
23. Какие функции выполняет протокол Open Flow?
24. В чём состоит необходимость применения T-SDN?
25. Какие преимущества создаст T-SDN при использовании в мультисервисной сети связи?
26. В чём состоят отличия традиционной архитектуры оптической транспортной сети от архитектуры с технологией T-SDN?
27. Какие функции выполняют контроллеры T-SDN?
28. Какими стандартами определяется применение T-SDN в транспортных сетях?

6. Электрические и оптические интерфейсы

По определению *интерфейс* – граница между двумя взаимодействующими системами или устройствами, определяемая общими функциональными и конструктивными характеристиками, требованиями к протоколам обмена.

Электрические и оптические интерфейсы аппаратуры мультисервисных сетей представлены большой номенклатурой в стандартах и в практическом исполнении.

Электрические и оптические интерфейсы определены стандартами международных организаций ITU-T (МСЭ-Т), IEEE, OSI, RFC, IEC и т.д. Стандарты закрепляют физическую и логическую (протокольную) структуру интерфейсов, которая должна соблюдаться всеми производителями техники связи.

В физической структуре интерфейсов указываются возможности передатчиков и приёмников при их подключении к линии, форматы сигналов, линейное кодирование, типы разъёмов, волновое сопротивление, маски импульсных сигналов, фазовые дрожания и т.д.

В логической структуре интерфейсов указываются возможности и порядок упаковки и передачи данных от различных источников, данных служебного назначения, управления защитными переключениями и т.д.

В практическом исполнении интерфейсы представляют собой отдельные блоки/модули (SFP, XFP, CFP), транспондеры и мукспондеры с разъёмами для подключения в электрические и оптические цепи [3].

Ниже рассматриваются стандарты на интерфейсы и характеристики интерфейсов, которые наиболее часто используются в составе аппаратуры оптических мультисервисных транспортных сетей.

6.1. Электрические интерфейсы

Электрические интерфейсы аппаратуры мультисервисных сетей подразделяют:

- интерфейсы PDH (по рекомендациям МСЭ-Т G.703, G.704);
- интерфейсы Ethernet (по стандартам IEEE 802.3);
- интерфейсы управления (по рекомендациям МСЭ-Т серии M.3xxx);
- интерфейсы синхронизации (T1, T2, T3, T4 по рекомендациям МСЭ-Т G.703.10, G.811, G.812, G.813, G.783, G.798) и другие.

Примеры характеристик электрических интерфейсов G.703 приведены в табл. 6.1. Эти интерфейсы используются в аппаратуре транспортных сетей в качестве компонентных, т.е. для подключения оборудования коммутационных станций, гибких мультиплексоров, оборудования плезиохронных систем передачи и т.д. Одной из контролируемых характеристик этих интерфейсов является величина дрожания фазы (джиттер), нормативы на которые приведены в табл. 6.2.

К пользовательским интерфейсам аппаратуры транспортных сетей также можно отнести электрические интерфейсы передачи данных сетей Ethernet на скоростях 10, 100 и 1000 Мбит/с, примеры характеристик которых представлены в табл. 6.3. При этом в качестве среды передачи используются витые пары категории 3, 4, 5 и выше.

Нетрудно заметить очень ограниченные длины участков передачи, что свидетельствует о возможности использования этих интерфейсов в основном внутри зданий (в офисах, в линейных аппаратных цехах и т.д.).

При выполнении курсового проекта необходимо выбрать подходящий электрический интерфейс для установки его в оборудование, электрический кабель желательно не ниже категории 5, и кроссовое коммутационное оборудование, через которое будет устанавливаться связь между коммутатором Ethernet и мультисервисной транспортной платформой (МСТП).

В качестве интерфейса синхронизации чаще всего используется электрический интерфейс G.703.10, который аналогичен по своим характеристикам интерфейсу G.703.6, но отличается более высокими требованиями по фазовым дрожаниям в полосе частот 20 Гц - 100 кГц, где допустимое дрожание не должно превышать 0,05ЕИ.

Таблица 6.1. Характеристики интерфейса G.703

Характеристики	Виды интерфейсов G.703		
	G.703.6	G.703.8	G.703.9
Скорость передачи, Мбит/с	2.048	34.368	139.264
Стабильность тактов, ppm	±50	±20	±15
Максимальное затухание линии на полутаковой частоте, дБ/МГц	0-6/ 1.024	0-12/ 17.184	0-12/ 70
Волновое сопротивление, Ом	75 (несим.) 120 (сим.)	75 (несим.)	75 (несим.)
Величина напряжения пика импульса и его пробела, В	2.37 несим. 3.0 сим. 0±0.237 несим. 0±0.3 сим.	2.37 несим. 0±0.237 несим	2.37 несим. 0±0.237 несим
Длительность единичного или тактового интервала, нс	488	29.1	7.18
Длительность импульса на единичном интервале, нс	244	14.55	≤2
Максимальное уширение импульса на уровне 3дБ, нс	269	17	±0.35
Линейный код	HDB-3	HDB-3	CM1

При этом для передачи синхронизирующего сигнала 2048 кГц или 2048 кбит/с можно использовать симметричные витые пары и коаксиальные кабели с затуханием на частоте 1024 кГц не более 6 дБ на всю длину.

Эти характеристики необходимо учитывать при проектировании сети распределения синхросигналов внутри узла связи, т.е. учесть место

оборудования распределения сигналов синхронизации (например, ВЗГ) и длину электрических кабелей, расходящихся к различной синхронизируемой цифровой аппаратуре.

Таблица 6.2. Параметры джиттера на выходе трактов с интерфейсами G.703, образованных на сети с помощью оборудования SDH

Интерфейс	Ширина полосы измерительного фильтра на уровне 3 дБ, Гц	Размах дрожаний в тактовых или единичных интервалах, ТИ или ЕИ
G.703.6 (2.048 Мбит/с)	20 Гц ÷ 100 кГц	1,5
	18 кГц ÷ 100 кГц	0,2
G.703.8 (34.368 Мбит/с)	100 Гц ÷ 800 кГц	1,5
	10 кГц ÷ 800 кГц	0,15
G.703.9 (139.264 Мбит/с)	200 Гц ÷ 3,5 МГц	1,5
	10 кГц ÷ 3,5 МГц	0,075

Таблица 6.3. Характеристики электрических интерфейсов Ethernet

Интерфейс	10Base-T	100Base-TX	100Base-T4	1000Base-CX	1000Base-T
Порт устройства	RJ-45	RJ-45	RJ-45	RJ-45	RJ-45
Среда передачи	Витая пара UTP категор. 3 и выше	Витая пара UTP категор. 5	Витая пара UTP категор. 3, 4, 5	Экранир. витая пара STP 150 Ом	Витая пара UTP категор. 5 и выше
Линейный код	Манчестер	4B5B скрембл.	8B6T	8B10B	РАМ-5 скрембл.
Формат линейного сигнала	-	MLT-3	NRZ	NRZ	Пяти-уровневый сигнал
Число витых пар	2	2	4	2	4
Протяженность сегмента	До 100 м	До 100 м	До 100 м	До 25 м	До 100 м

Электрические интерфейсы управления чаще всего представлены интерфейсами Ethernet на скорости 10 Мбит/с или 100 Мбит/с с разъёмами RJ-45 и консольными интерфейсами RS-232. Эти интерфейсы, соответственно, позволяют подключить систему сетевого управления для всей транспортной сети или локальный терминал управления отдельным сетевым элементом на основе оборудования МСТП. Возможности интерфейсов Ethernet показаны выше. Возможности интерфейса RS-232 состоят в следующем: двухканальный, двунаправленный; длина кабеля не более 15 м; скорость передачи 64 кбит/с; виды передачи сигналов – последовательно синхронно и асинхронно; используются различные типы разъёмов (от 9 до 25 штырьковых соединений). Указанные характеристики интерфейсов управления необходимо учитывать при проектировании расположения аппаратуры системы управления и места оператора управления.

6.2. Оптические интерфейсы

Оптические интерфейсы транспортных сетей характеризуются развивающимся разнообразием. Это обусловлено развитием новых технологий передачи и внедрением новых компонентов: перестраиваемых лазеров; оптических усилителей; компактных компенсаторов дисперсии; процессоров коррекции ошибок FEC и т.д. В качестве стандартов на оптические интерфейсы применяются рекомендации ITU-T и IEEE 802.3. В соответствии с этими стандартами оптические интерфейсы можно разделить на три группы (рис.6.1):

- одноканальные, т.е. обеспечивающие передачу только на одной оптической частоте (G.955, G.957, G.691, G.693, IEEE 802.3 u,z);
- многоканальные, т.е. обеспечивающие передачу на двух и более оптических частотах одновременно (G.692, G.694.1, G.694.2, G.695, G.696.1, G.696.2, G.698.1, G.698.2, G.959.1);
- оптические интерфейсы пассивных оптических сетей (PON), которые поддерживают передачу оптических сигналов на 1, 2, 3 и более оптических частотах (G.983, G.984, G.985, IEEE 802.3ah).

Ниже приводится краткая характеристика указанных оптических интерфейсов и возможностей их применения.

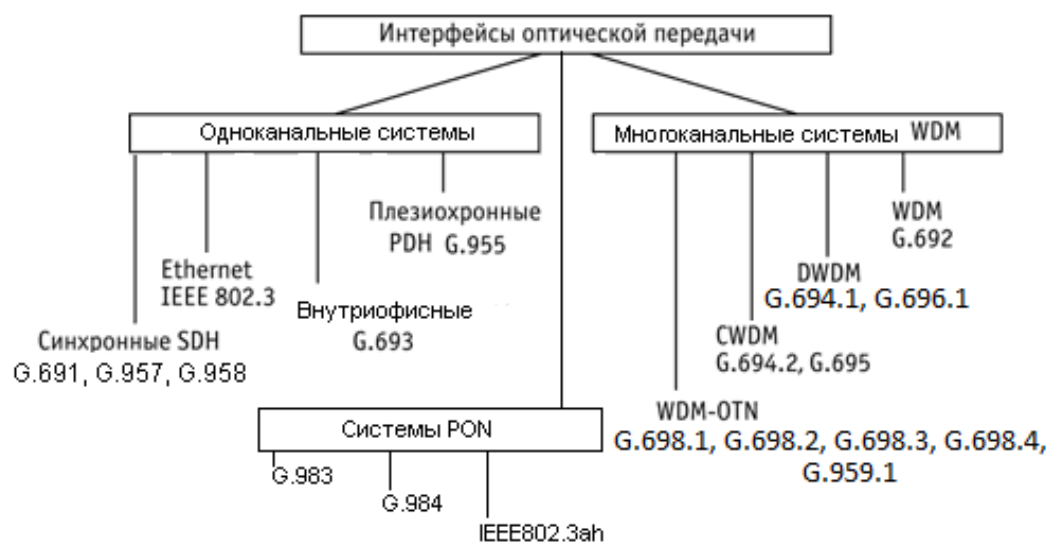


Рис.6.1. Общая классификация оптических интерфейсов

6.2.1. Одноканальные оптические интерфейсы

Одноканальные оптические интерфейсы стандарта G.955 предназначены для аппаратуры плезиохронных систем передачи PDH со скоростными режимами: 2048 кбит/с; 8448 кбит/с; 34368 кбит/с; 136264 кбит/с. Эти интерфейсы поддерживают соединение типа «точка-точка» по одному или двум волокнам оптического кабеля на относительно небольшие расстояния. Оптические характеристики интерфейсов представлены в табл. 6.4.

Уровень мощности передачи и чувствительность приёмника используются для расчёта энергетического потенциала интерфейса, что, в свою очередь, позволяет оценить максимальную дальность передачи в линии с ОМВ и ММВ. Характеристика динамического диапазона приемника позволяет оценить возможную максимальную мощность передатчика.

Эти интерфейсы не получили широкого применения в оптических транспортных сетях. Они используются на соединительных линиях между терминалами и оборудованием транспортной сети (компонентными блоками). На предельных расстояниях, с точки зрения энергетического потенциала, рекомендуется производить расчёт полосы пропускания оптического тракта и её сравнение с требуемой полосой частот для линейного сигнала [1]. Это необходимо для учета дисперсионные искажения в волоконных световодах, особенно в ММВ.

Таблица 6.4. Примеры характеристик оптических интерфейсов PDH

Характеристика	Тип волокна	Иерархические скорости			
Скорость, Мбит/с		2,048	8,448	34,368	139,264
Минимальный уровень мощности передачи СИД и ППЛ, дБм					
Волна СИД: 0,85 мкм	ММВ	-17,0	-17,0	-17,0	–
Волна СИД: 1,31 мкм	ММВ	-21,0	-21,0	-21,0	–
Волна СИД: 1,31 мкм	ОМВ	-30,0	-30,0	-30,0	–
Волна ППЛ: 1,31 мкм	ММВ	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
Волна ППЛ: 1,31 мкм	ОМВ	-4,0	-4,0	-4,0	-4,0
Волна ППЛ: 1,3 мкм	ОМВ	-14,0	-14,0	-14,0	-14,0
Волна ППЛ: 1,55 мкм	ОМВ	–	–	-7,0	-7,0
Чувствительность приёмника при вероятности ошибки 10^{-9} , дБм					
Волна 0,85 мкм	ММВ	-51	-46	-40	–
Волна 1,31 мкм	ОМВ, ММВ	-52	-47	-42	-35
Волна 1,31 и 1,55 мкм	ОМВ	–	–	–	-38
Динамический диапазон приемника, дБ					
Волна 0,85 мкм	ММВ	> 40	> 34	> 26	–
Волна 1,31 и 1,55 мкм	ОМВ, ММВ	> 53	> 48	> 40	> 35
Обозначения: СИД – светоизлучающий диод; ППЛ – полупроводниковый лазер; ММВ – многомодовое волокно стандарта G.651; ОМВ – одномодовое волокно стандарта G.652					

Оптические одноканальные интерфейсы стандартов G.957 и G.691 предназначены для аппаратуры синхронной цифровой иерархии SDH со скоростными режимами передачи от 155520 кбит/с до 39813120 кбит/с. Интерфейсы поддерживают соединение типа «точка-точка» по паре одномодовых волоконных световодов, соответствующих стандартам G.652, G.653, G.654, G.655, G.656. Допускается возможность использования на коротких линиях только одного волокна в кабеле и направленных разветвителей для организации двухсторонней связи на различных волнах, например 1310 нм и 1550 нм.

Оптические интерфейсы SDH имеют три обширных категории применения:

- внутристанционные связи, соответствующие расстояниям присоединения от нескольких метров (перемычки) до 2 км;

- межстанционные связи малой дальности, соответствующие расстояниям присоединения до 15 км;

- межстанционные связи большой дальности, соответствующие расстояниям присоединения до 40 км на волне передачи 1310 нм и около 80 км на волне передачи 1550 нм.

В рамках каждой из трёх категорий рассматривается использование различных источников излучения (по типу излучателя, по длине волны, по спектру излучения, по виду модуляции и т.д.), приёмников излучения (ЛФД, р-і-n), типу волоконных световодов (SMF, DSF, NZDSF) и т.д. В табл. 6.5 представлена классификация интерфейсов SDH.

Таблица 6.5. Классификация оптических интерфейсов SDH по применению

Применение Параметры		Внутри узла	Межузловое применение						
			Короткая линия		Длинная линия				
Длина волны источника, нм		1310	1310	1550	1310	1550			
Тип волокна		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652, 654, 655		G.653, G.655	
Расстояние, км		2	~15	~15	~40	~80		~80	
Уровень STM-N, скорость Мбит/с	STM-1 155,52	I-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2		L-1.3	
	STM-4 622,08	I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	U-4.2	L-4.3	U-4.3
	STM-16 2488,32	I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	U-16.2 V-16.2	L-16.3	U-16.3 V-16.3
	STM-64 9953,28	I-64	S-64.1	S-64.2	L-64.1	L-64.2	V-64.2	L-64.3	U-64.3 V-64.3
	STM-256 39813,12	I-256.2	-	S-256.2	-	L-256.2	-	L-256.3	-

Оптические интерфейсы SDH имеют систему обозначений, в которой отражены особенности интерфейсов по применению:

- I, обозначает линию малой длины внутри предприятия, т.е. intra-office;
- S, обозначает короткую линию, т.е. short-haul;
- L, обозначает длинную линию, т.е. long-haul;
- V, обозначает очень длинную линию, т.е. very long-haul;
- U, обозначает сверх длинную линию, т.е. ultra long-haul;
- VSR, обозначает очень короткое расстояние (в перемычке), т.е. very short reach (в табл.6.5 не обозначено).

При обозначении V и U следует понимать включение в состав линейного интерфейса оптического усилителя (ОА) мощности на передаче (обозначается

В – booster, В-ОА) и предусилителя оптического сигнала на приеме (обозначается ВР – booster pre-amplifier, ВР-ОА).

После буквенных индексов в обозначениях интерфейсов следуют цифры:

- первая (-ые) цифра (-ы) указывают на иерархический уровень STM-N (N=1, 4, 16, 64, 256);

- вторая цифра или пробел указывает на номинал длины волны излучения источником и типы волокон (1 или пробел - источник излучения длины волны 1310 нм на волокне G.652; 2 – источник излучения длины волны 1550 нм на волокне G.652 для применения на малой дальности, либо на волокнах G.654 и G.655 для приложений большой дальности; 3 - источник излучения длины волны 1550 нм на волокнах G.653 и G.655 для приложений большой дальности).

На рис. 6.2 представлена схема подключения интерфейса G.957 к волоконно-оптической линии. В схеме показаны две оконечные станции и промежуточная станция регенерации. Все участки этого соединения определяются стандартами МСЭ-Т. Интерфейсные стыки участков находятся в точках S и R, что соответствует подключению передатчика (S – send) и приёмника (R – receive). Эти точки ассоциируются с местом стыка волокон линейного и станционного оптических кабелей на линейном оптическом кроссе. Как правило, длина станционного оптического кабеля между линейным кроссом и аппаратурой не превышает нескольких метров. Поэтому характеристики оптических интерфейсов при соответствующей погрешности могут оцениваться непосредственно в аппаратуре. Для определения параметров оптических интерфейсов SDH предложены следующие характеристики:

- диапазон рабочих длин волн;
- тип источника излучения;
- спектральные характеристики излучения;
- средняя вводимая мощность в точке S;
- коэффициент гашения (логарифм отношения мощности при передаче логической «1» и логического «0»);
- маска глаз-диаграммы;
- оптический тракт (величины максимального затухания и дисперсии между точками S и R, максимальная величина отражения оптического сигнала на неоднородностях);
- чувствительность приёмника;
- перегрузка приемника;
- отражательная способность приёмника;

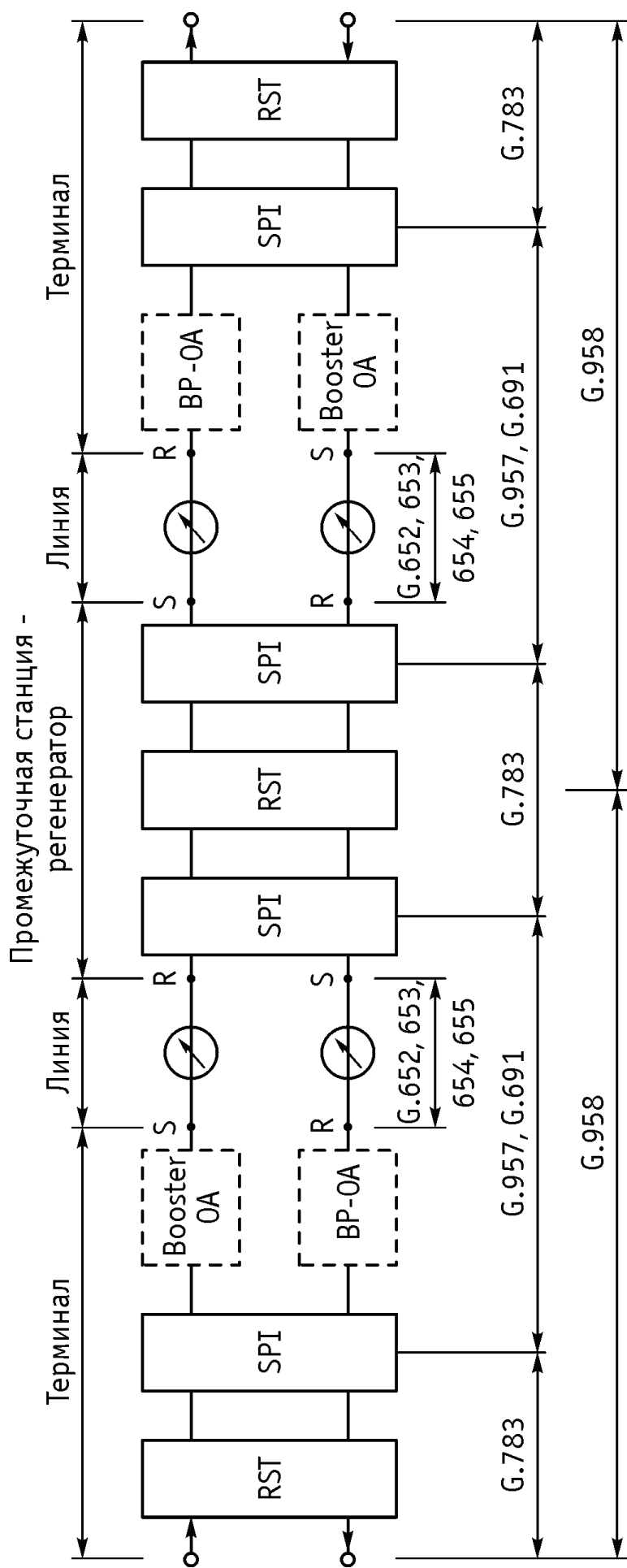


Рисунок 6.2 Пример включения интерфейсов аппаратуры SDN для волоконно-оптической линии

- штраф по мощности оптического тракта (отражения, межсимвольные помехи, шум распределения мод, изменение длины волны излучателя).

На рис. 6.2 обозначены стандартные функциональные блоки аппаратуры SDH, определенные в рекомендации МСЭ-T G.783: SPI, SDH Physical Interface – физический интерфейс SDH с подключением к линии или оптическому усилителю (OA); RST, Regenerator Section Termination – окончание секции регенерации (функции доступа к заголовку RSOH).

Взаимосвязь некоторых оптических параметров представлена на рис. 6.3.



Рис. 6.3. Взаимосвязь оптических параметров

Примеры характеристик интерфейсов приведены в приложениях 1, 2.

Необходимо обратить внимание на то, что одноканальные интерфейсы STM-64 имеют особенности применения, которые необходимо учитывать при проектировании:

- в результате введения в тракт оптических усилителей могут быть достигнуты достаточно большие мощности (около 50 мВт), оказывающие значительные влияния на оптические нелинейности;

- специальные методы адаптации к дисперсии (компенсация дисперсии - Dispersion Compensated, DC), связанные с тем, что стандартные волокна (G.652) имеют дисперсионный предел для этих интерфейсов около 60 км, необходимо использовать для увеличения дальности передачи путём включения пассивных компенсаторов в виде интегрированных дифракционных решеток и волоконных световодов, активной компенсации на основе фазовой автомодуляции (ФАМ) (нелинейный эффект в стекловолокне) и предварительной линейной частотной модуляции (ПЛЧМ);

- применение в составе интерфейсов для очень длинных линий процессоров упреждающей коррекции ошибок (FEC), которые повышают энергетический потенциал на 3-12 дБ.

Возможна комбинация методов компенсации дисперсии. В настоящее время определена только одна комбинация методов: ФАМ совместно с пассивной компенсацией дисперсии в интерфейсе V-64.2. Технология ФАМ применяется для компенсации на первых 80 км, а дополнительно 40 км компенсируется пассивным методом. Компенсаторы дисперсии с волокнами DCF рассчитаны на дистанции от 20 до 120 км с шагом 10 или 20 км. При дистанциях от 60 км до 100 км в полосе волн 1525 -1565 нм вносимые дополнительные значения затухания составят: 60 км – 7,5 дБ; 80 км - 9,15 дБ; 100 км - 10,6 дБ. При сопоставимых ценовых показателях компактные компенсаторы хроматической дисперсии на волоконных брэгговских решетках с переменным шагом DCM FBG (Dispersion Compensation Module Fiber Bragg Grating) с отрицательным значением хроматической дисперсии в диапазоне длин волн 1525-1565 нм имеет лучшие массогабаритные показатели и меньшие вносимые потери мощности. Они предназначены для исправления формы оптических сигналов, которые искажаются под влиянием хроматической дисперсии в процессе прохождения оптического волокна на дистанциях до 200 км. Модули выпускаются на эквивалентные длины компенсируемого волокна 20, 40, 60, 80 и 100 км. Максимальные значения вносимых затуханий в пределах 3 дБ - 4,5 дБ и не зависят от длины волоконно-оптической линии (<http://www.prointech.ru/catalog/dwdm/kompensatory-dispersii.html>).

Примеры использования пассивных компенсаторов показаны на рис. 6.4. Для интерфейсов типа S-64 участки длиной до 40км проектируются без компенсации дисперсии. Для каждого более длинного участка с применением интерфейсов L-64.2, V-64.2 прибавляется по одному компенсатору на 40 км.

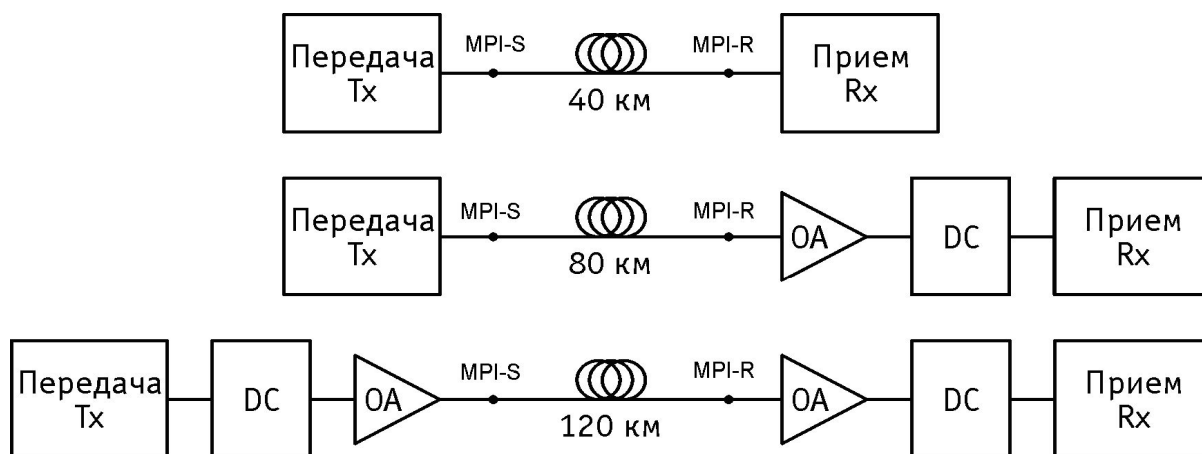


Рис. 6.4. Схема пассивной компенсации дисперсии в интерфейсах STM-64

Ещё одной особенностью оптических интерфейсов STM-64 является использование другого обозначения точек, где нормируются параметры

передатчика и приёмника, т.е. вместо обозначения S и R применяется MPI-S и MPI-R (Main Path Interfaces). Применение электронных модулей цифровой обработки сигналов для компенсации дисперсии в транспортных сетях с когерентными интерфейсами предусмотрено стандартными решениями для магистральных оптических сетей. Они имеют очень большой диапазон компенсации дисперсии (более 70 000 пс/нм, что эквивалентно 4 000 км волокна SMF в диапазоне 1530 - 1625 нм).

Использование характеристик одноканальных (одноволновых) оптических интерфейсов при проектировании линейных трактов определено рекомендациями МСЭ-Т G.655. Длина регенерационного участка (РУ) с точки зрения энергетического потенциала находится через соотношение:

$$L_{\text{ру}} = \frac{P_s - P_R - P_D - M_e - (N - 1)l_{\text{ст}} - N_c l_{\text{стр}}}{\alpha_c + \alpha_m},$$

где P_s – уровень мощности передатчика в точке подключения аппаратуры и линии; P_R – уровень мощности приемника в точке подключения аппаратуры и линии; P_D – мощность (в дБм) дисперсионных потерь; M_e – энергетический запас на старение оборудования (разность уровня мощности передачи максимального и минимального); N – число строительных длин кабеля; $l_{\text{ст}}$ – потери мощности на неразъемных стыках кабеля; N_c – число разъемных стыков (2 или 4 стыка на участке секции регенерации); $l_{\text{стр}}$ – потери мощности на разъемных стыках; α_c – километрическое затухание кабеля на заданной длине волны; α_m – запас на повреждение (дБ/км). Строительная длина кабеля принимается в расчетах от 4 до 6 км.

Пример расчета длины РУ для интерфейса V-64.2 с исходными данными (см. приложение 1,2):

$P_s = 15$ дБм; $P_R = -23$ дБм; $P_D = 2$ дБ; $M_e = 3$ дБ; $l_{\text{ст}} = 0.05$ дБ; $l_{\text{стр}} = 0.1$ дБ; $\alpha = 0.2$ дБ/км; $\alpha_m = 0.05$ дБ/км; строительная длина кабеля 6 км.

$$L_{\text{ру}} = \frac{15 + 23 - 2 - 3}{0.2 + 0.05} = 132 \text{ км}$$

Число строительных длин на участке 132 км составит $M = 132/6 = 22$.

С учетом потерь на стыках длина участка передачи (дистанция) составит

$$L_{\text{ру}} = \frac{15 + 23 - 2 - 3 - 21 \times 0.05 + 4 \times 0.1}{0.2 + 0.05} = 126.2 \text{ км}$$

Т.о. длина участка составит 126,2 км с точки зрения допустимых потерь оптической мощности. На длине волны 1550 нм величина дисперсии не должна превышать 2400 пс/нм. Для стандартного одномодового волокна (рекомендация МСЭ-Т G.652) на волне 1550 нм значение хроматической дисперсии составляет 18 пс/нм×км, а на дистанции 126,2 км будет

$$D_{\text{хр}} = 18 \times 126.2 = 2271.6 \text{ пс/нм}.$$

Т.о. норматив на хроматическую дисперсию выполняется при ширине спектральной линии источника излучения (лазер типа DFB) 1 нм. Однако на скорости передачи 10 Гбит/с необходимо учитывать и поляризационную модовую дисперсию (ПМД),

$$D_{\text{пмд}} = \sigma_{\text{пмд}} \times \sqrt{L_{\text{пу}}},$$

где $\sigma_{\text{пмд}}$ нормировано по отношению к длине волокна $0.5 \text{ пс} / \sqrt{\text{км}}$. В этом случае необходимо добавить к $D_{\text{хр}}$ величину $D_{\text{пмд}}$, которая вычисляется:

$$D_{\text{пмд}} = 0,5 \sqrt{126,2} = 5,616 \text{ пс}.$$

Результирующая дисперсия определяется через соотношение

$$D_{\Sigma} = \sqrt{D_{\text{хр}}^2 + D_{\text{пмд}}^2}, \text{ т.е. } D_{\Sigma} = (2271,6^2 + 5,616^2)^{0,5} = 2271,6069 \text{ пс}$$

Нетрудно заметить, что совокупная величина хроматической и поляризационной дисперсии не превосходит нормативное значение дисперсии для интерфейса V-64.2

Другой подход: определить требуемое значение дисперсии на 1 км линии и сравнить с нормированным стандартным значением 18 пс/нм×км:

$$2400 \frac{\text{пс}}{\text{нм}} / 126,2 \text{ км} = 19,1 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \times \text{км}}.$$

Т.о. допустимый норматив 19,1 пс/нм×км превышает нормированный, что указывает на допустимость использования интерфейса V-64.2 на дистанции 126,2 км. По величине полученной километрической дисперсии можно выбрать:

- подходящий тип волокна;
- длину волны передатчика в диапазоне (1547-1562 нм);
- подходящую ширину спектральной линии передатчика, измеряемую в долях нм, например, 0,2 нм;
- подходящий компенсатор дисперсии при необходимости.

Также необходимо отметить, что некоторая часть оптических интерфейсов SDH специфицирована в рекомендации ITU-T G.959.1 для одноканальных подключений в аппаратуре OTN-ОТН.

Оптический интерфейс стандарта G.693 предназначен для передачи оптических сигналов во внутриофисных трактах на короткие дистанции. Параметры интерфейса определены: для передатчика – в точке MPI-S, для приемника – в точке MPI-R, а для оптического тракта – между точками MPI-S и MPI-R (рис.6.2). Однако оптический тракт не предусмотрен с оптическими усилителями.

Коды приложений интерфейсов имеют следующую структуру:

$$\mathbf{W-yAz},$$

где:

W указывает заданное расстояние:

– VSR600, VSR1000 и VSR2000 указывают соответственно расстояния в 0,6 км, 1 км и 2 км.

у указывает наивысший поддерживаемый класс оптического компонентного сигнала: 2 - NRZ 10G; 3 - NRZ 40G.

A указывает категорию затухания:

- R максимальное затухание 4 дБ;
- L максимальное затухание 6 дБ;
- M максимальное затухание 12 дБ;
- H максимальное затухание 16 дБ;
- V максимальное затухание в дБ (не определено).

Категория V введена для случая, когда максимальное значение затухания, создаваемое категорией H, слишком мало, чтобы охватить все приложения.

z указывает тип источника и оптическое волокно:

- 1 источник 1310 нм для оптического волокна стандарта G.652;
- 2 источник 1550 нм для оптического волокна стандарта G.652;
- 3 источник 1550 нм для оптического волокна стандарта G.653;
- 5 источник 1550 нм для оптического волокна стандарта G.655.

Для некоторых прикладных кодов в конце кода добавляется индекс **F** для указания того, что в данном приложении требуется передача байтов FEC, как определено в рекомендации МСЭ-Т G.709/Y.1331.

Пример обозначения: VSR600-2R1, VSR – внутриофисное соединение или перемычка; 600 - дистанция в метрах; 2 - сигнал пользователя в формате NRZ на скорости 10Гбит/с; R – максимальное затухание 4 дБ; 1 – источник 1310 нм для волокна G.652. Детальные характеристики интерфейсов приведены в приложении 2.

Одноканальные оптические интерфейсы IEEE 802.3 предназначены для поддержки передачи данных в сетях Ethernet на скоростях 10Мбит/с (IEEE802.3a-t 10BASE-FB, 10BASE-FP, 10BASE-FL), 100Мбит/с (IEEE802.3u 100BASE-FX), 1000Мбит/с (IEEE802.3z/ab 1000BASE-SX, 1000BASE-LH, 1000BASE-LS), 10Гбит/с (IEEE802.3ae 10GBASE-SR, 10GBASE-SW, 10GBASE-LX, 10GBASE-LR, 10GBASE-LW, 10GBASE-ER, 10GBASE-EW). Перспективной является разработка стандарта интерфейса 100GBASE-X со скоростным режимом передачи 100Гбит/с. Информация о характеристиках интерфейсов Ethernet приведена в [3, 7, 18]. В табл. 6.6 показаны отдельные примеры характеристик оптических интерфейсов Ethernet, которыми можно воспользоваться при выполнении расчетов участков передачи в проекте.

Ниже приведены некоторые выдержки из стандарта IEEE 802.3ae (10-Gigabit Ethernet по волоконно-оптическому кабелю) для трех различных семейств интерфейсов: 10GBASE-X, 10GBASE-R и 10GBASE-W. Они отличаются методами кодирования, используемыми при передаче трафика между сетевыми устройствами (8B/10B или 64B/66B), и наличием или отсутствием подуровней интерфейса WAN для согласования с сетями SDH

уровня STM-64. В каждом семействе имеются различные реализации среды передачи данных.

В 10GBASE-X используется схема кодирования сигнала 8В/10В. Подуровни интерфейса WAN отсутствуют. Текущий стандарт IEEE 802.3ae предусматривает одну спецификацию, известную как 10GBASE-LX4. 10GBASE-R базируется на схеме кодирования 64В /66В. Для этого физического уровня имеется три типа среды: 10GBASE-SR, 10GBASE-LR и 10GBASE-ER.

Таблица 6.6. Примеры характеристик оптических интерфейсов для конверторов Ethernet на скорости 100 и 1000 Мбит/с (IEEE 802.3)

Тип интерфейса Ethernet	Дальность передачи, км (тип волокна)	Диапазон волн, нм	Диапазон уровня мощности, дБм, (кодирование)	Перегрузка приемника, дБм	Чувствительность приемника, дБм
100BASE-F	2 (ММВ)	1270-1380	От -20 до -14 (4В5В)	-14	-34
1000BASE-LH	70 (ОМВ)	1480-1580	От -3 до +2 (8В10В)	-3	-23
1000BASE-LS	10 (ОМВ) 0,55 (ММВ)	1270-1335	От -11 до -3 (8В10В)	-3	-19
1000BASE-SX	0,2- 0,5 (ММВ)	830-860	От -9,5 до -4 (8В10В)	-3	-17

Интерфейс 10GBASE-W определяет инкапсуляцию 64В/66В-кодированных данных в кадр STM-64. Здесь специфицируются следующие среды: 10GBASE-SW, 10GBASE-LW и 10GBASE-EW. Интерфейсы 10GBASE-R и 10GBASE-W также имеют подуровень интерфейса WAN. Максимальная протяженность оптической линии в зависимости от типа волокон для интерфейсов 10GBASE-SX/SR/SW (длина волны 850 нм) показана в табл.6.7.

Таблица 6.7. Протяженность оптической линии для интерфейсов 10GBASE-SX/SR/SW

Тип волокна	Широкополосность, МГц×км	Дистанция, м
62.5 мкм ММВ	160	26
62.5 мкм ММВ	200	33
50 мкм ММВ	400	66
50 мкм ММВ	500	82
50 мкм ММВ	2000	300

Максимальная протяженность оптической линии в зависимости от типа волокон для интерфейсов 10GBASE-LX/LR/LW (длина волны 1300 нм) показана в табл. 6.8.

Таблица 6.8. Протяженность оптической линии для интерфейсов 10GBASE-LX/LR/LW

Тип волокна	Широкополосность, МГц×км	Дистанция, м
62.5 мкм ММВ	500	300
50 мкм ММВ	400	240
50 мкм ММВ	500	300
10 мкм ОМВ	-	10000

Максимальная протяженность оптической линии с волокном типа SMF для интерфейсов 10GBASE-EX/ER/EW на волне 1550 нм не превышает 40 км

6.2.2. Многоканальные оптические интерфейсы

Многоканальный оптический интерфейс стандарта G.692 предназначен для построения волоконно-оптических систем передачи мультиплексирования с разделением по длине волны WDM. Это первый международный стандарт, которым предусмотрено эффективное использование полосы частот одномодового стекловолокна для передачи одновременно до 50 независимых оптических сигналов с аналоговым или цифровым трафиком. Оптические сигналы переносятся на оптических частотах, генерируемых отдельными лазерами. Частоты соответствуют диапазону длин волн 1520-1560 нм. В этом диапазоне несущие частоты расположены с шагом 100 ГГц, 200 ГГц, 400 ГГц, 500 ГГц, 500/400 ГГц, 600 ГГц, 1000 ГГц. Определен оптический сервисный канал на волне 1510 ± 10 нм (что соответствует частоте $198,5 \pm 1,4$ ТГц).

На рис. 6.5 представлены основные устройства и точки нормирования характеристик оптических интерфейсов. К основным устройствам относятся: передатчики $T_{хп}$, генерирующие оптические частоты f_n , модулируемые в передатчике информационным сигналом; оптический мультиплексор OMX (Optical Multiplex), объединяющий сигналы $f_1 - f_n$ в многоканальный (многоволновый) оптический тракт; оптический усилитель ОА (Optical Amplifier), повышающий мощности сигналов всех каналов до необходимого уровня в оптическом тракте; волоконно-оптическая линия; промежуточный оптический усилитель (ОА) для увеличения дистанции передачи; оптический демультиплексор ODMX (Optical DeMultiplex), разделяющий сигналы $f_1 - f_n$ на отдельные каналы; приёмники оптических сигналов $R_{хп}$, в которых оптический информационный сигнал преобразуется в электрический.

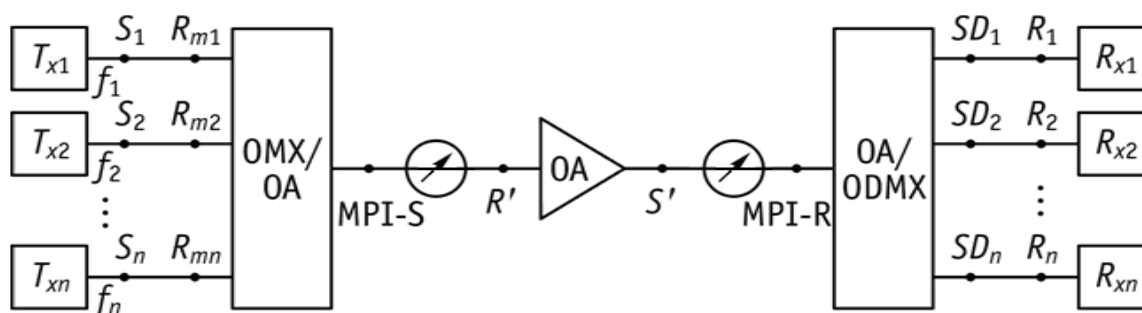


Рис. 6.5. Точки нормирования характеристик оптических интерфейсов по рекомендации G.692

Точки $S_1 \dots S_n$ – подключение оптических соединительных кабелей к передатчикам $T_{x1} \dots T_{xn}$ отдельных каналов с нормированными оптическими частотами $f_1 \dots f_n$.

Точки $R_{m1} \dots R_{mn}$ – подключение оптических соединительных кабелей к оптическому мультиплексору OMX, совмещенному с оптическим усилителем OA.

Точка MPI-S – подключение оптического мультиплексора с усилителем к оптическому линейному кабелю.

Точки S' , R' – подключение промежуточного оптического усилителя OA к линейному оптическому кабелю.

Точка MPI-R – подключение оптического предусилителя OA, совмещенного с демультиплексором ODMX, к оптическому линейному кабелю.

Точки $SD_1 \dots SD_n$ – подключение оптического демультиплексора к оптическим соединительным кабелям.

Точки $R_1 \dots R_n$ – подключение оптических соединительных кабелей к входам приемников $R_{x1} \dots R_{xn}$.

Все перечисленные точки подключения представлены разъёмными соединителями - коннекторами.

Блоки $T_{x1} \dots T_{xn}$ и $R_{x1} \dots R_{xn}$ входят в состав транспондеров, функции которых рассмотрены в главе 2.

В обозначениях кода применения интерфейсов принята следующая система (G.692):

$$nWx-y,z,$$

где n – максимальное число оптических несущих частот или волн; W – указание на длину линии (L – длинная, V – очень длинная, U – сверхдлинная); x – число участков усиления; y – уровень STM-N; z – тип волокна (индексы 2, 3, 5 соответствуют стандартам волокон G.652, G.653, G.655). Примеры обозначений приведены в табл.6.9.

Установлены максимальные значения затухания между оптическими усилителями протяженных линий (табл. 6.10) и максимальная величина дисперсии всего оптического тракта передачи для каждого из каналов со скоростью передачи около 2.5 Гбит/с, например, STM-16 (табл.6.11). Величина

дисперсии для тракта с STM-64 (интерфейсы SDH L-64.2a, V-64.2a) может уложиться только в однопролетные участки, обозначенные L и V.

Таблица 6.9. Коды применения интерфейсов WDM

Участок применения	Длинный L (80 км)		Очень длинный V (120 км)	
Число участков	5	8	3	5
Код применения 4-канальной системы	4L5-y,z	4L8-y,z	4V3-y,z	4V5-y,z
Код применения 8-канальной системы	8L5-y,z	8L8-y,z	8V3-y,z	8V5-y,z
Код применения 16-канальной системы	16L5-y,z	16L8-y,z	16V3-y,z	16V5-y,z

Таблица 6.10. Затухание участков передачи многоволновых сигналов

Код применения интерфейса	nL-y,z	nV-y,z	nU-y,z	nLx-y,z	nVx-y,z
Максимальное затухание, дБ	22	33	44	22	33

Таблица 6.11. Нормирование максимальной дисперсии

Код применения интерфейса	L	V	U	nV3-y,z	mL5-y,z	nV5-y,z	nL8-y,z
Максимальная дисперсия, пс/нм	1600	2400	3200	7200	8000	12000	12800

В рекомендации G.692 предусмотрен случай организации в оптическом тракте двунаправленной системы передачи с разделением по длинам волн передачи и приёма. Тогда в коде интерфейса появляется индекс В (bidirectional):

В-nWx-y,z.

Для многоканальных оптических систем передачи с плотным мультиплексированием по волнам DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) разработан стандарт G.694.1.

Сетка оптических частот согласно G.694.1 может соответствовать соотношениям:

12,5 ГГц между волнами (в ТГц) $193,1 + n \times 0,0125$;

25 ГГц между волнами (в ТГц) $193,1 + n \times 0,025$;

50 ГГц между волнами (в ТГц) $193,1 + n \times 0,05$;

100 ГГц между волнами (в ТГц) $193,1 + n \times 0,1$.

Число n – целое и может иметь знак «+» и «-». Например, для волны 1624,89 нм будет частота 184,5 ТГц при значении скорости света $2,99792458 \times 10^8$ м/с. Использование этой сетки частот предусмотрено стандартами G.696, G.698, G.959 в многоканальных интерфейсах для различных приложений, которые рассматриваются далее.

Для многоканальных оптических систем передачи с разреженным мультиплексированием по волнам CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) разработан стандарт G.694.2.

Сетка оптических волн согласно G.694.2 может соответствовать следующей последовательности: 1271 нм, 1291 нм, 1311 нм, 1331 нм, 1351 нм, 1371 нм, 1391 нм, 1411 нм, 1431 нм, 1451 нм, 1471 нм, 1491 нм, 1511 нм, 1531 нм, 1551 нм, 1571 нм, 1591 нм, 1611 нм. Интервал между волнами 20 нм при допустимом отклонении каждой из волн $\pm 6-7$ нм от указанного номинала.

Использование этой сетки частот предусмотрено стандартом G.695 в многоканальных интерфейсах для различных приложений: с односторонней передачей в оптическом тракте (рис.6.6); с двусторонней передачей в одноволоконном оптическом тракте (рис.6.7); с передачей в оптическом тракте и доступом к отдельным каналам в промежуточной станции (OADM); с передачей в кольцевых структурах на основе OADM и т.д. Во всех примерах появилось отличие в обозначении интерфейсных точек MPI-S_M и MPI-R_M. Где индекс «М» указывает на многоканальный интерфейс.

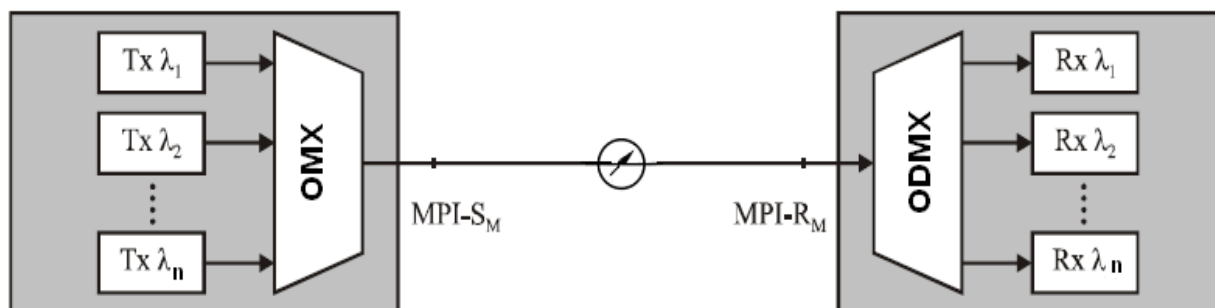


Рис.6.6. Пример односторонней схемы системы передачи CWDM

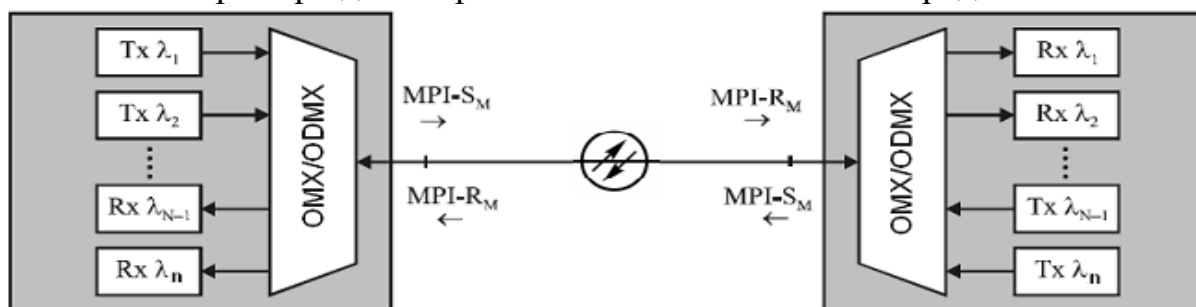


Рис. 6.7. Пример двунаправленной схемы системы передачи CWDM

Возможности интерфейсов с CWDM можно определить через код применения:

$$\mathbf{CnWx-ytz},$$

где **C** – принадлежность к CWDM; **n** – максимальное число волновых каналов (до 18); **W** – длина участка передачи (**S** – короткий, **L** – длинный); **x** – число участков усиления; **y** – указание класса пользовательского сигнала (0 – NRZ 1.25 Гбит/с, 1 – NRZ 2.5 Гбит/с); **t** – указание на поддерживаемый состав интерфейса (**A** – наличие усилителя оптической мощности на передаче и оптического предусилителя на приеме; **B** – использование только усилителя

оптической мощности на передаче; С – использование оптического предусилителя; D – отсутствие оптических усилителей); **z** – указание на тип волокна (индексы 2, 3, 5 соответствуют стандартам волокон G.652, G.653, G.655).

Для расширения кодов применения используются индексы В и S.

B-CnWx-ytz,

где В – обозначает двустороннюю передачу в одном волоконном световоде,

S-CnWx-ytz,

где S – обозначает использование архитектуры линии «Black-link», т.е. тёмной линии. Примеры использования обозначений приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12. Пример классификации 8-канальных интерфейсов CWDM

Участок применения интерфейса	Короткий S	Длинный L	
Тип волокна	G.652	G.652	G.653
Обозначение интерфейса	–	B-C8L1-0D2	B-C8L1-0D3
Расстояние передачи компонентного сигнала в формате NRZ (на скорости 1,25Гбит/с), км	–	64	64
Обозначение интерфейса	C8S1-1D2 B-C8S1-1D2	C8L1-1D2 B-C8L1-1D2	B-C8L1-1D3
Расстояние передачи компонентного сигнала в формате NRZ (на скорости 2,5 Гбит/с), км	27	55	58

Для точек MPI-S_M и MPI-R_M нормируются параметры: максимальной мощности каждого канала и минимальной мощности; максимальной общей мощности всех каналов; значения волн; интервал между волнами; глубина модуляции; максимальное затухание между точками передачи S и приема R; максимальная хроматическая дисперсия и ряд других параметров. Детальные примеры характеристик интерфейсов приведены в приложении 3.

В стандарте G.696.1 предоставлены спецификации физического уровня для внутридоменных (внутризоновых) приложений организации оптических сетей с DWDM. Эти спецификации предоставляются для межузловых, многоканальных оптических систем с линейными оптическими усилителями или без них. Пример конфигурации системы DWDM с промежуточными оптическими усилителями (ОА) приведён на рис.6.8, где отличаются обозначения транспондерных блоков (3R вместо T_{x1}....T_{xn} и R_{x1}....R_{xn}).

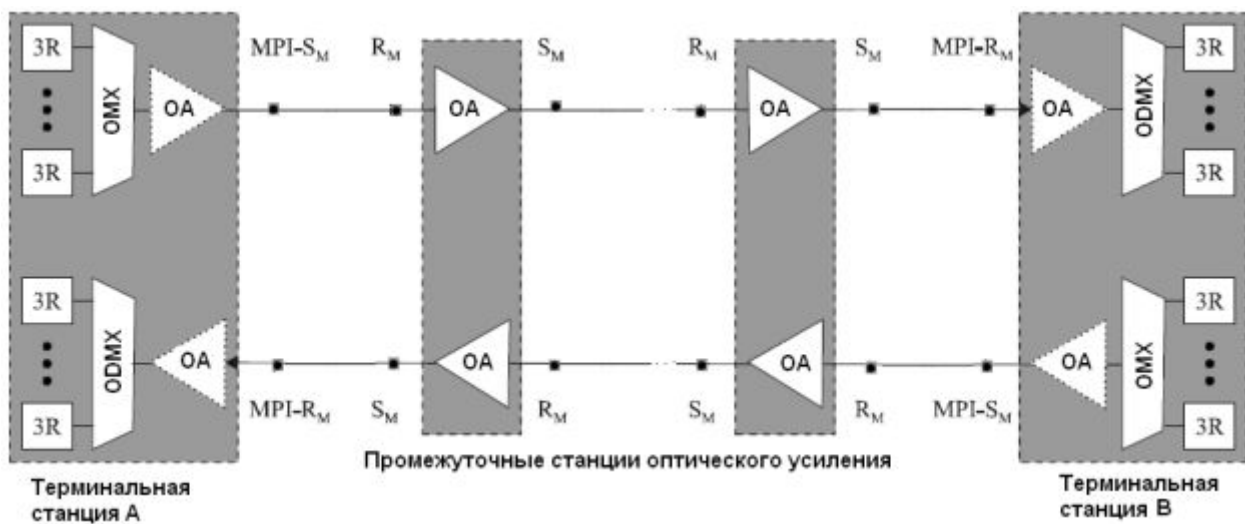


Рис. 6.8. Конфигурация многопролётной оптической системы передачи с DWDM

Обозначение прикладного кода составляется следующим образом:

n.B-xWF(s),

где: **n** - максимальное число каналов, поддерживаемых в соединениях;

B - указывает класс клиента: 1.25G указывает скорость передачи битов клиента в диапазоне от 622 Мбит/с до 1,25 Гбит/с; 2.5G указывает скорость передачи битов клиента в диапазоне от 622 Мбит/с до 2,5 Гбит/с; 10G указывает скорость передачи битов клиента в диапазоне от 2,4 Гбит/с до 10,5 Гбит/с; 40G указывает скорость передачи битов клиента в диапазоне от 9,9 Гбит/с до 42 Гбит/с;

x - число пролетов;

W - буква, указывающая на затухание в пролете, например:

S - указывает на малую протяженность (максимальное затухание на пролете до 11 дБ),

L - указывает на большую протяженность (максимальное затухание на пролете до 22 дБ, минимальное 11дБ),

V - указывает на очень большую протяженность (максимальное затухание на пролете до 33 дБ, минимальное 22дБ);

F - является типом волокна (полностью детализированным), например G.652.A, ... G.652.D обозначаемым в прикладном коде через "652A" ... "652D", соответственно;

(S) - указывает диапазон рабочих длин волн через полосы спектра.

Дескриптор диапазона волн (нм) S: O (Original – исходный) 1260–1360 нм; E (Extended – расширенный) 1360–1460 нм; S (Short wavelength – коротковолновый) 1460–1530 нм; C (Conventional – обыкновенный) 1530–1565 нм; L (Long wavelength – длинноволновый) 1565–1625 нм.

Если используется более чем одна спектральная полоса, то обозначение в (s) становится буквами полосы, разделенными знаком "+", например для приложения, требующего использования полос C и L, (s) будет (C + L). В случае, когда применяется более одной спектральной полосы, используют порядок букв от меньших длин волн к большим длинам волн.

В случае рамановской системы передачи с усилением и DWDM в конце прикладного кода добавляется буква "R", и код записывается:

n.B-xWF(s)R.

Пример конкретных приложений мог бы выглядеть следующим образом:

40.10G-20L652A(C)R. Это приложение указывает на 40-канальную систему с сигналами полезной информации на скорости 10 Гбит/с (10G), с 20 пролетами большой протяженности волокна G.652A, которые годятся для использования с рамановскими усилителями. Полоса C используется в качестве рабочего диапазона длин волн.

Нормируемыми характеристиками оптической передачи являются согласно G.696.1: максимальное затухание на пролет; минимальное затухание на пролет; тип волокна; рабочий диапазон длин волн; минимальная хроматическая дисперсия на пролет; максимальная хроматическая дисперсия на пролет; минимальный местный коэффициент хроматической дисперсии; максимальное отклонение хроматической дисперсии; максимальная дифференциальная групповая задержка; минимальные оптические возвратные потери на MPI-S_M или S_M; максимальное дискретное отражение между MPI-S_M и MPI-R_M.

Детальные характеристики интерфейсов рассмотрены в стандарте G.959.1.

Стандарт G.698.1 содержит спецификацию многоканальных DWDM приложений с одноканальными оптическими интерфейсами сетей типа «МЕТРО». При этом предусмотрены конфигурации транспортных сетей: точка-точка и кольцо с дистанцией между станциями доступа к отдельным каналам от 30 до 80 км. Предусмотрено использование сетки оптических частот стандарта G.694.1 со спектральным интервалом 100 ГГц и скоростью передачи данных в каждом канале DWDM до 10 Гбит/с. Оптический тракт может строиться по двухволоконной и одноволоконной схемам. В двухволоконной схеме поддерживается односторонняя передача сигналов с DWDM, а в одноволоконной схеме поддерживается двухсторонняя передача сигналов с DWDM по одному волокну встречно на разных волнах. В соединениях типа «точка-точка» могут устанавливаться мультиплексоры терминальные и OADM (рис.6.9). Кольцевые структуры сети предусмотрены только с использованием OADM и оптических транспондеров (рис.6.10). В спецификацию вошли характеристики интерфейсов между точками S_S и R_S, которые детально представлены в приложении 5.

Обозначение прикладного кода стандарта G.698.1 составляется следующим порядком:

DScW-ytz(v),

где:

- **D** – индикатор DWDM приложений;
- **S** – индицирует спектральный диапазон: **N** (Narrow spectral) меньший спектр ; **W** (Wide spectral) широкий спектр;
- **s** интервал между каналами в ГГц;
- **W** – обозначает возможную дистанцию передачи: **S** (short-haul) короткая; **L** (long-haul) длинная;

- **y** – индицирует класс сигнала нагрузки пользователя: 1 - NRZ 2.5G; 2 - NRZ 10G;
 - **t** - указание на поддерживаемый состав интерфейса: D без оптических усилителей ;
 - **z** – индицирует тип волокна: 2 - G.652 ; 3 - G.653; 5 - G.655 .
 - (**v**) – индицирует диапазон волн (нм): S (Short wavelength- коротковолновый) от 1460 до 1530 нм; C (Conventional- обыкновенный) от 1530 до 1565 нм; L (Long wavelength - длинноволновый) от 1565 до 1625 нм;
- если добавляется знак "+", то это обозначает совместное использование диапазонов (C+L).

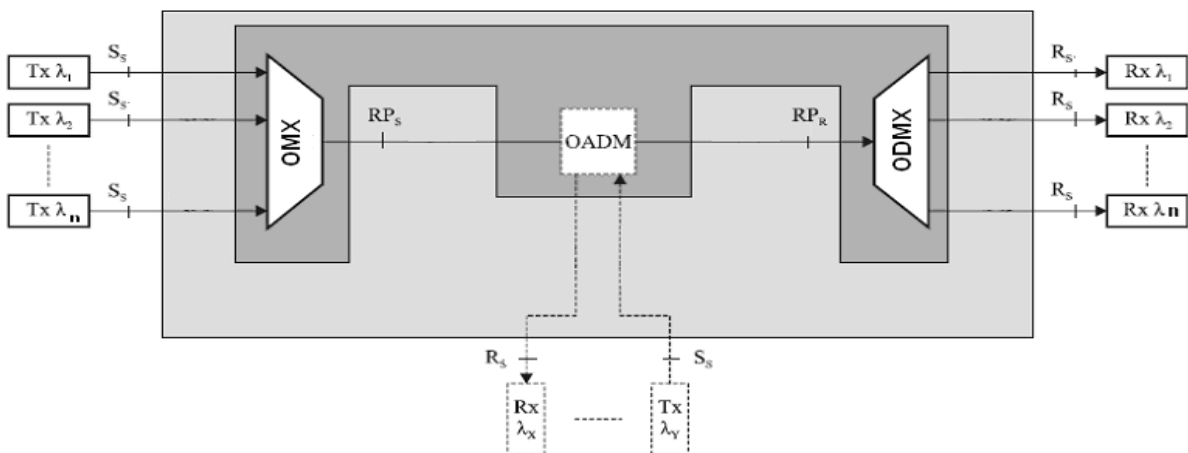


Рис. 6.9. Структура соединения «точка-точка» оптической сети с DWDM доступом к отдельным оптическим каналам

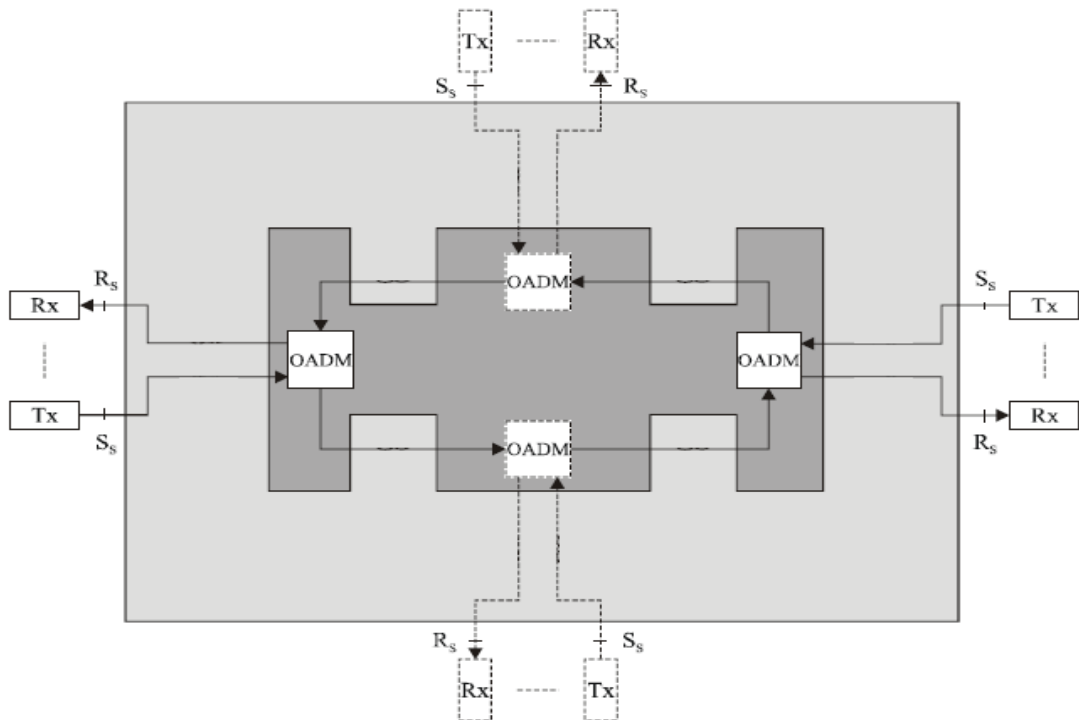


Рис. 6.10. Структура соединения «кольцо» оптической сети с DWDM

В случае двунаправленной передачи по одному волокну к обозначению добавляется индекс **B**:

B-DScW-ytz(v)

Кроме того, если добавляется в конце индекс **F**, то это свидетельствует о использовании функции FEC согласно G.709.

Оптические многоканальные интерфейсы OTN, определенные в стандарте G.959.1, имеют код применения:

PnWx-ytz,

где **P** – индикатор применения в OTN; **n** – максимальное число волновых каналов; **W** – максимальное расстояние передачи (VSR – очень короткие участки – перемычки в аппаратуре; I – внутриофисные соединения (перекрываемое затухание 0-7 дБ); S – короткие расстояния (затухание до 11 дБ); L – протяженные линии (затухание до 22 дБ); V – очень длинные линии (затухание до 33 дБ)); **x** – число участков усиления; **y** – указание на класс сигнала от пользователя (1 – сигнал в коде NRZ на скорости 2,5Гбит/с, 2 – сигнал в коде NRZ на скорости 10 Гбит/с, 3 – сигнал в коде NRZ на скорости 40Гбит/с, 7 – сигнал в коде RZ на скорости 40Гбит/с); **t** – указание на конфигурации передачи и приема (A – оптические усилители передачи и оптические предварительные усилители приема; B – только усилитель оптической мощности передачи; C – только оптический предусилитель на приеме; D – отсутствие оптического усилителя); **z** – указание на источник оптических волн и тип волокна (1 – для волны 1310 нм и волокна G.652; индексы 2, 3, 5 соответствуют стандартам волокон G.652, G.653, G.655 для волн вблизи 1550нм).

Пример обозначения интерфейса OTN: P16S1-2B5 – OTN, 16 волн, затухание 11 дБ, OTU-2 (NRZ 10 Гбит/с), только усилитель мощности передачи, волокно G.655.

В системах двунаправленной передачи в одном волокне к обозначению добавляется индекс **B**:

BnWx-ytz.

В конце обозначения могут использоваться дополнительные индексы:

- F – индикация функции FEC согласно G.709;
- D – индикация использования адаптации к дисперсии (компенсации дисперсии);
- E – индикация применения электронной компенсации дисперсии на приеме;
- r – индикация ограничения дистанции передачи дисперсией;
- a – код использования лавинного фотодиода (APD);
- b – код использования фотодиода p-i-n. Примеры характеристик в приложении 5.

6.2.3. Различия между характеристиками эквивалентных оптических интерфейсов

Некоторые из рассмотренных кодов приложений оптических интерфейсов эквивалентны. Это касается значения параметров интерфейсов G.693, которые должны заменить приложения интерфейсов G.691 и G.959.1. В таблицах 6.13-6.15 приведены параметры различия для некоторых интерфейсов.

Таблица 6.13. Различия параметров интерфейсов VSR600-2R1, P1I1-2D1r, I-64.1r

Стандарт	G.693	G.959.1	G.691
Код приложения	VSR600-2R1	P1I1-2D1r	I-64.1r
Рабочий диапазон волн, нм	1268-1360	1260-1360	1260-1360

Таблица 6.14. Различия параметров интерфейсов VSR2000-2R1 и P1I1-2D1

Стандарт	G.693	G.959.1
Код приложения	VSR2000-2R1	P1I1-2D1
Максимальная хроматическая дисперсия, пс/нм	6.6	Нет данных

Таблица 6.15. Различия параметров интерфейсов VSR2000-2L2, P1I1-2D2r, I.64.2r

Стандарт	G.693	G.959.1	G.691
Код приложения	VSR2000-2L2	P1I1-2D2r	I.64.2r
Рабочий диапазон волн, нм	1530-1565	1500-1580	1530-1565
Максимальное затухание, дБ	6	7	7
Минимальная чувствительность, дБм	-13	-14	-14

6.2.4. Оценка характеристик оптических трактов

В этом разделе приводится комплексная оценка возможностей использования оптических трактов при организации многоканальной передачи (CWDM, DWDM) в условиях различных ограничений:

- затухание участков передачи;
- дисперсионные искажения;
- штрафы за ухудшение характеристик передачи;
- мощность оптического сигнала в канале;
- совокупная мощность оптических сигналов в многоканальной системе;
- накопление шумов оптического усиления и снижение OSNR;
- использование различных типов оптических усилителей;
- нестабильность оптической несущей волны;
- накопление неравномерности усиления;
- неоднородные дистанции пролётов;
- оптическая нелинейность;
- формат модуляции;

- число оптических каналов и их разнос по спектру;
- выделение и ввод оптических каналов;
- смешивание волокон разного типа.

Каждое из перечисленных ограничений должно быть предметом анализа и оценки при разработке конкретного проекта. Первое, на что нужно обратить внимание это типы волокон оптического кабеля (табл.6.16). Каждый тип волокна может иметь свою специфику применения (табл.6.17).

Таблица 6.16. Типы волокон для многоканальных оптических систем передачи

G.652	G.653	G.654	G.655	G.656	G.657
G.652a	G.653a	G.654a	G.655a		G.657a
G.652b	G.653b	G.654b	G.655b		G.657b
G.652c		G.654c	G.655c		
G.652d					

Полоса длин волн пропускания одномодовых оптических волокон (1260-1675нм) разделена на диапазоны. Каждый диапазон имеет свой код. Различные коды определяют ограничение на диапазоны длин волн в зависимости от требований к дисперсии.

«Исходный» диапазон О, от 1260 нм до 1360 нм.

Рекомендациями МСЭ-Т G.652 предусмотрены волокна с низким пиком «водяного» затухания в виде подкатегории G.652.C. Указано, что «Эта подкатегория позволяет также передачу интерфейсом G.957 в частях диапазона свыше 1360 нм и ниже 1530 нм». Влияние малого «водяного» пика пренебрежимо мало на длинах волн свыше 1460 нм. Это определяет *«Расширенный» диапазон Е, от 1360 нм до 1460 нм.*

Диапазоны для приложений с оптическими усилителями, с использованием одноканальной передачи согласно Рекомендации МСЭ-Т G.691 и многоканальной передачи согласно Рекомендации МСЭ-Т G.692, были позже разделены. Вначале усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA), имел полезные полосы усиления, которые начинались примерно на 1530 нм и заканчивались примерно на

1565 нм. Эта полоса усиления получила название *диапазон С*, причем оценки его границы различаются в литературе и коммерческих спецификациях. Область от 1530 нм до 1565 нм была одобрена для волокна NZDSF (G.655) и систем SDH STM-64 (G.691), и для этой области были разработаны спецификации. Т.о. *«Обычный или условный» диапазон С, от 1530 нм до 1565 нм.* Усилители EDFA с относительно более ровной и более широкой полосой усиления стали доступными, причем усилители EDFA не накладывают ограничений на эту полосу. Можно упомянуть некоторые конструкции EDFA, превосходящие диапазон С.

Таблица 6.17. Характеристики типов волокон

Стандарт МСЭ-T	Номинал модового пятна (мин), мкм	Номинал модового пятна (макс), мкм	Допустимое отклонение, мкм	Рабочая волна, нм	Применение волокон
G.652a,b	8.6	9.5	0.6	1310	Одномодовое (SF), 9/125мкм оптим. дисперсия 3.5 пс/нм×км на волне 1310нм, на 1550нм затухание 0.2 дБ/км, дисперсия: 18 пс/нм×км, 0.5 – 0.2 пс/√км
G.654a	9.5	10.5	0.7	1550	Одномодовое волокно (CSF), для протяженных подводных линий с оптическими усилителями
G.654b		13.0			
G.654c		10.5			
G.652c,d	8.6	9.5	0.6	1310	Улучшенное (SF) без «водяного пика» для CWDM в диапазоне 1285-1625 нм, МЕТРО, 17 пс/нм×км, 0.02 пс/√км
G.653a,b	7.8	8.5	0.8	1550	Волокно со смещенной дисперсией (DSF), протяженные линии с оптическими усилителями
G.655a	8.0	11.0	0.7	1550	Волокна со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF). Рабочий диапазон 1530-1625 нм. Для протяженных линий DWDM (до 320волн), 4.5 пс/нм×км, 0.1-0.5 пс/√км, 0.2 дБ/км
G.655b					
G.655c					
G.655d					
G.655e					
G.656	7.0	11.0	0.7	1550	Волокно (NZDSF). Рабочий диапазон волн 1460-1625нм протяженные линии CWDM, DWDM, 2-14 пс/нм×км, 0.2 пс/√км
G.657a	8.6	9.5	0.4	1310	Без «водяного пика» для CWDM в диапазоне 1310-1625 нм
G.657b	6.3	9.5	0.4	1310	Сети доступа

Область ниже диапазона С получила название *диапазон S*. В конкретных приложениях не весь этот диапазон может быть доступен для сигнальных каналов. Некоторые длины волн могут использоваться для накачки оптоволоконных усилителей как активно-ионного типа, так и рамановского типа. Некоторые длины волн могут резервироваться для оптического контрольного канала (OSC). Нижний предел этого диапазона берется равным верхнему пределу диапазона E, а верхний предел берется равным нижнему пределу диапазона С. Т.о. определен *диапазон S «Коротких волн»*, от 1460 нм до 1530 нм.

При более длинных волнах над диапазоном С рабочие характеристики волоконно-оптических кабелей в некотором диапазоне температур приемлемы до волны 1625 нм для существующих типов волокон. Более того, желательно использовать такую широкую область длин волн, которая подходит для передачи сигналов. Это *диапазон L «Длинных волн»*, от 1565 нм до 1625 нм.

Для волоконно-оптических линейно-кабельных сооружений в рекомендации МСЭ-Т L.40 определен ряд функций технического обслуживания – профилактических, после ввода в действие, перед обслуживанием и после повреждения. Они охватывают деятельность по наблюдению, испытанию и управлению с использованием тестирования рефлектометром OTDR, идентификации волокна, проверки затухания и контроля питания. Длины волн для технического обслуживания определены в рекомендации МСЭ-Т L.41.

В некоторых случаях испытательный сигнал может перекрываться сигналами передачи, если испытательная мощность достаточно мала по сравнению с мощностью передачи. В остальных случаях испытательная длина волны может быть в области, не занятой каналами передачи для конкретного применения. В частности, область, которую предполагается не использовать для этих каналов, может быть подходящей для технического обслуживания даже в случаях, когда имеет повышенное затухание.

Диапазон U (Ultra-long wavelength) «Сверхдлинных волн», от 1625 нм до 1675 нм.

Диапазон U предназначен только для целей возможного технического обслуживания, а передача сигналов, переносящих трафик, в настоящее время не предполагается.

Использование диапазона U для целей, отличных от передачи, должно обеспечивать пренебрежимо малое влияние на сигналы передачи в других диапазонах. Работа волокна в этом диапазоне не гарантируется. Ожидается, что в ближайшем будущем различные приложения, с оптическими усилителями и без них, будут использовать передачу сигналов во всей области от 1260 нм до 1625 нм.

В любом из рабочих диапазонов предполагается, что оптическое затухание волокна компенсируется оптическими усилителями, а хроматическая дисперсия компенсируется с помощью компенсаторов хроматической дисперсии. При этом остаются влияния шума усиленного спонтанного излучения (УСИ или усиленной спонтанной эмиссии УСЭ, другое обозначение ASE) и

поляризационной модовой дисперсии (ПМД). Они ограничивают дистанцию передачи и пропускную способность одноканальных и многоканальных систем. Это, прежде всего, относится к скоростным режимам 10 и 40 Гбит/с, а в дальнейшем и 100 Гбит/с. Степень неблагоприятного воздействия УСИ и ПМД на оптические сигналы также зависит от вида линейного кодирования (RZ или NRZ), от выбора вида модуляции (CS-RZ, DPSK, DQPSK и т.д.). Повысить защищенность сигнала позволяет применение FEC. Т.о. оценка возможности линейного тракта ВОСП представляет собой достаточно сложную многопараметрическую задачу. При этом необходимо руководствоваться указанными стандартами и рекомендациями производителей конкретного оборудования.

Влияние шума УСИ определяется в отношении оптический сигнал/шум (ООСШ) или, как принято обозначать, OSNR (Optical Signal Noise Ratio). Протяженные линейные тракты предполагают использование цепочки последовательно включенных оптических усилителей. Шум УСИ накапливается от вкладов всех оптических усилителей, что ухудшает OSNR после каждого усилителя. Для оценки накопления шумов в линейном тракте оптической системы с усилителями в [80] предложена методика. В ней предполагается, что все оптические усилители в цепочке одинаково шумят (усилитель мощности, предусилитель, линейный усилитель учитывается только шум усиленной спонтанной эмиссии ASE), затухание для оптических каналов на всех участках передачи между усилителями одинаковы, выходные мощности на всех усилителях для всех каналов одинаковы. В таком случае на входе R любого ОА и оконечного устройства MPI-R с ОА и ODMX (рис.6.5) можно оценить OSNR:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \lg \left(N + \frac{10^{0.1 \times G_{BA}}}{10^{0.1 \times L}} \right) - 10 \lg(h \times f \times \Delta f), \quad (6.1)$$

где P_{out} – выходной уровень мощности ОА для одного канала (дБм), L – потери на пролете (дБ), G_{BA} – усиление оптического усилителя мощности (дБ), NF – коэффициент шума оптического усилителя (дБ), h – постоянная Планка (в мДж×с, согласованная с P_{out} в дБм, т.е. произведение постоянной Планка и частот f и Δf , относительно 1мВт), f – оптическая частота (Гц), Δf – эталонная ширина полосы пропускания в Гц, $N-1$ – общее число линейных усилителей.

Если $G_{BA} = L$, то соотношение для OSNR можно упростить:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \lg(N + 1) - 10 \lg(h \times f \times \Delta f). \quad (6.2)$$

Шумом усилителя мощности можно пренебречь, если потери в пролёте соответствуют усилению линейного усилителя. При этом соотношение для OSNR упростится:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \lg(N) - 10 \lg(h \times f \times \Delta f). \quad (6.3)$$

Уравнение для OSNR также действительно для однопролётного участка с усилителем мощности:

$$OSNR = P_{out} - G_{BA} - NF - 10\lg(h \times f \times \Delta f), \quad (6.4)$$

и действительно на однопролётном участке с предусилителем:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\lg(h \times f \times \Delta f). \quad (6.5)$$

Величина $10\lg(h \times f \times \Delta f)$ для полосы пропускания 0,1 нм равна (-58 дБ). В других случаях, т.е. при полосе отличной от 0,1 нм необходимо выполнить расчёт величины $10\lg(h \times f \times \Delta f)$. К другим случаям относится выбор формата внешней модуляции, например, при модуляции в формате RZ на скорости 2,5 Гбит/с спектр модулированного сигнала не превышает 12,5 ГГц (0,1 нм) на уровне -30 дБм. Однако при модуляции в этом формате на скорости 10 Гбит/с спектр модулированного сигнала увеличивается до 40 ГГц на уровне -30 дБм, что существенно превышает величину 0,1 нм и должно быть учтено при определении OSNR (см. рис. 6.13).

Использование усиления Рамана и FEC может позволить увеличение участков оптических секций мультиплексирования. В [80] показана на примере соотношения OSNR роль усиления Рамана и использование FEC (рис.6.11). В рассматриваемом примере скорость передачи 10 Гбит/с, кодирование NRZ, полоса пропускания 0.1 нм, потери на пролет 22 дБ, уровень мощности передачи +3 дБм, коэффициент шума EDFA 6.5 дБ, длина одного пролета 80 км.

Величина ПМД может существенно влиять на дальность оптической передачи. Это необходимо учитывать при выборе типа волокон к конкретным приложениям (табл.6.17). Пример зависимости ПМД от расстояния для различных значений коэффициента ПМД приведён на рис.6.12 [80]. Примеры возможностей кодов FEC представлены в табл.6.18.

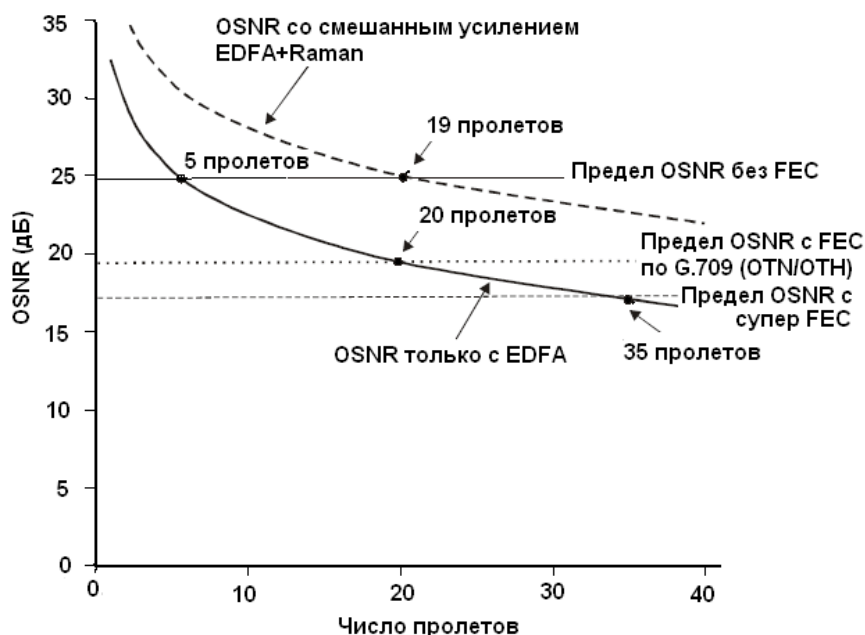


Рис. 6.11. Пределы OSNR для участков передачи с различными оптическими усилителями и упреждающей коррекцией ошибок FEC

В табл.6.18 обозначено и имеет смысл: RS код Рида –Соломона; минимальное допустимое отношение сигнал/помеха $Q_{\min}=18$ дБ для допустимого коэффициента ошибок $BER=10^{-9}$. Можно считать одиночный RS улучшающим чувствительность приемника на 6.5 дБ, а кратный RS на 9.5 дБ

Таблица 6.18. Характеристики используемых кодов FEC для ВОСП

Поколение FEC	Избыточность %	Тип кода	Порог исправления ошибок	
			по Q_{\min}	по BER
1	7	Одиночный RS	11.5дБ	10^{-4}
2	10-25	Кратный RS	8.5дБ	4×10^{-3}
3	20-25	Турбокод	6.2дБ	2×10^{-2}

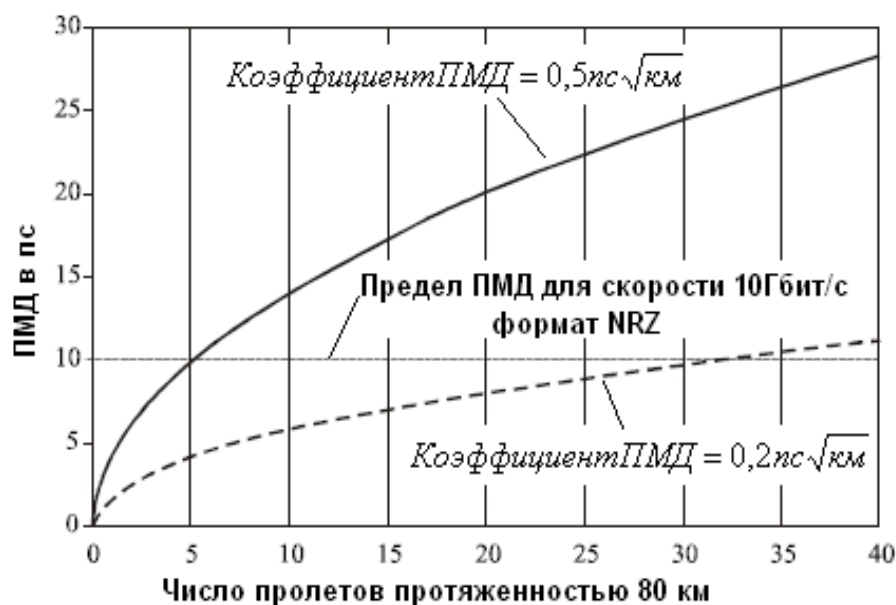


Рис. 6.12. Пример зависимости ПМД от расстояния и коэффициента ПМД

6.2.5. Расчёт характеристик передачи в оптическом канале при каскадировании оптических сетевых элементов

Рекомендацией МСЭ-T G.680 определён порядок расчёта характеристик передачи оптического канала при каскадном включении оптических сетевых элементов. При этом оптическими сетевыми элементами принято считать: линейный сегмент DWDM, в который входят оптические усилители, оптический кабель, компенсаторы дисперсии; мультиплексор OADM или ROADM; фотонный коммутатор (OXC или PXC); полностью оптические конверторы волн AOWC (All-optical Wavelength Converters); оптический 2R или 3R регенератор.

Оцениваемыми характеристиками передачи являются:

- оптическое отношение сигнал/шум OSNR (Optical Signal Noise Ratio);

- остаточная дисперсия RD (Residual Dispersion);
- поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion) и поляризационно-зависимые потери PDL (Polarization-Dependent Loss);
- накопление неравномерности частотной характеристики передачи в оптическом канале (Ripple – размах (неравномерность) уменьшения коэффициента передачи в пределах диапазона частот или длин волн канала);
- случайное изменение уровня мощности канала на выходе сетевого элемента.

Для выполнения расчетов по выше указанным позициям необходимо иметь точные данные характеристик всех каскадируемых оптических устройств. Примеры характеристик оптических сетевых элементов и примеры расчета при каскадировании приведены в приложениях 1, 2, 5, 6 и в [95].

Кроме того, для расчета OSNR необходимо учесть ширину спектральной линии модулированного оптического сигнала. Эта ширина может сильно зависеть от модуляционного формата и скорости передачи (рис.6.13, данные приведены на основе материалов [3,4]).

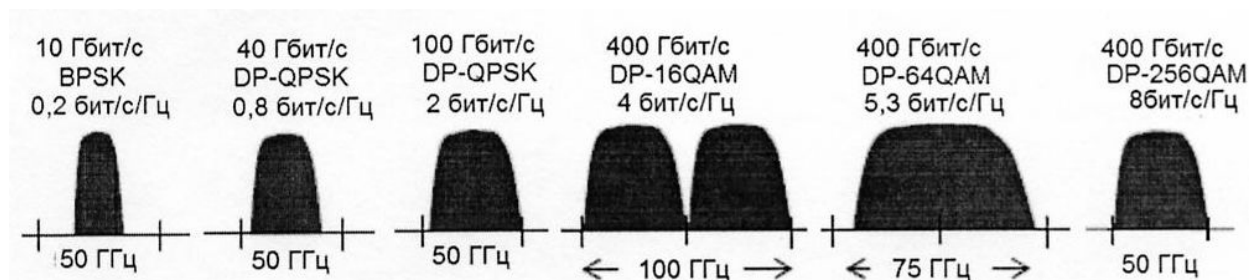


Рис. 6.13. Требуемые полосы частот оптических каналов в различных форматах модуляции

Также необходимо учесть, что при использовании технологии OTN-OTN скорости передачи в оптических каналах выше указанных в стандартных интерфейсах (2,7 Гбит/с для OTU-1; 10,7 Гбит/с для OTU-2; 43 Гбит/с для OTU-3; 120 Гбит/с для OTU-4 и до 400 Гбит/с, в перспективе суперканальные решения на скорости до 27 Тбит/с на стандартное волокно).

Помимо указанных проблем каскадирование различных сетевых элементов (оптических усилителей, компенсаторов дисперсии, оптических коммутаторов, мультиплексоров ROADM, различных волоконных световодов) появляется проблема определения штрафа за снижение OSNR (максимальный штраф оптического тракта), обусловленная рассеянием оптической мощности из-за дисперсии, накоплением помех нелинейного происхождения, помех из-за мультиплексоров ROADM, т.е. межканальные перекрёстные влияния, уменьшение полосы канала (рис.6.14) и т.д. Величина этого штрафа может иметь значения в пределах 1-6 дБ, например, для одноканального интерфейса DWDM 1L1-3C2F с OTU-3-FEC она составляет 3дБ (табл.П5.8 приложения 5). Также должен закладываться запас на период эксплуатации, когда OSNR может снижаться из-за ухудшения шумовых параметров оптических усилителей, ROADM, нелинейных помех от вновь вводимых в этом волокне оптических

каналов и т.д. Пример учёта нелинейных помех при расчёте когерентных оптических каналов приводится в [103].

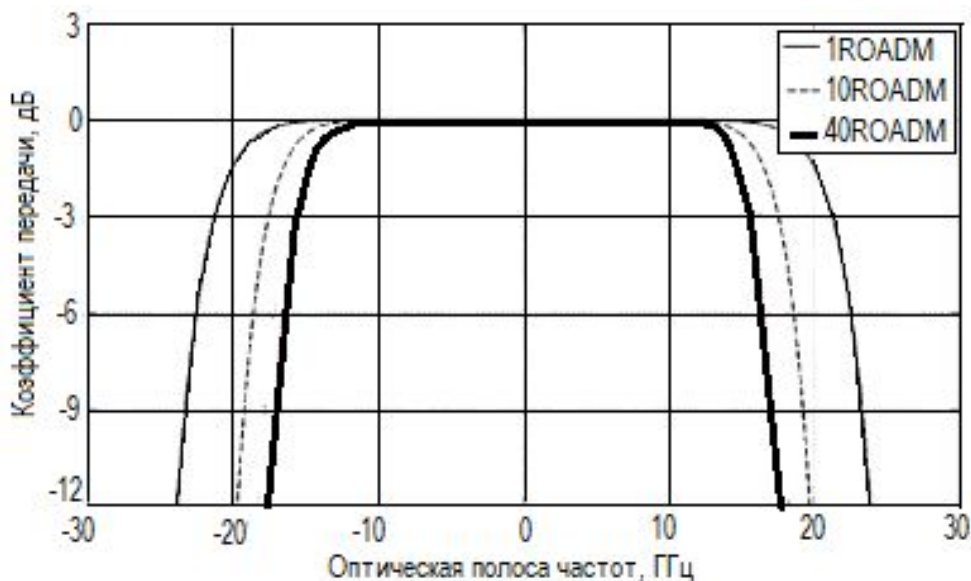


Рис. 6.14. Уменьшение рабочей полосы оптического канала при каскадировании ROADM (по уровню -3дБ уменьшение полосы от ~50 ГГц при 1ROADM до ~28 ГГц при 40ROADM)

6.2.6. Оптические интерфейсы пассивных оптических сетей

Оптические интерфейсы пассивных оптических сетей (PON) предназначены для передачи в одноволоконной линии на 2-х и большем числе оптических волн трафика пользователей (абонентов). Эти сети строятся на различных технологиях (A-PON, B-PON, E-PON, GPON, 10GPON, 40GPON). Эти технологии могут быть предметом отдельного изучения в рамках другого направления развития сетей связи – «Сети доступа». Т.е. оптические интерфейсы PON поддерживают транспортные функции сетей доступа. Максимальная дальность передачи в сетях PON регламентирована МСЭ-Т до 60 км. Поддерживаемые скоростные режимы передачи данных в стандартизированных интерфейсах составляют от 155 Мбит/с до 10/40 Гбит/с, а в перспективных до 100 Гбит/с и более.

В предлагаемом учебном пособии сети доступа не рассматриваются. Изучение построения интерфейсов PON будет иметь смысл для случая реализации LR-PON (long – reach PON, протяженной пассивной оптической сети) с дистанциями свыше 100 км, когда сеть такого типа сможет заместить транспортную сеть местного назначения [19]. Обширная информация по PON и интерфейсам приведена на сайте www.itu.int.

Контрольные вопросы

1. Что обозначает термин «Интерфейс» в технике связи?
2. Чем определяются характеристики интерфейсов?
3. Какие международные организации формируют стандарты на интерфейсы транспортных сетей?
4. Какие электрические интерфейсы применяются в аппаратуре мультисервисных транспортных сетей?
5. Чем отличаются между собой интерфейсы G.703.6, G.703.8 и G.703.9?
6. Какие электрические интерфейсы предусмотрены для сетей Ethernet?
7. Какой стандарт определяет возможности оптических интерфейсов PDH?
8. Какие приборы в оптических интерфейсах обеспечивают максимальную дальность передачи в одномодовом и многомодовом волокнах?
9. Какие категории применения имеют интерфейсы SDH?
10. На что указывают буквенные индексы I, S, L, U, V, VSR в интерфейсах SDH?
11. Какие характеристики определены для оптических интерфейсов SDH?
12. Что следует понимать под термином «перегрузка оптического приёмника»?
13. Что может использоваться в составе оптических интерфейсов для снижения или исключения дисперсионных искажений?
14. Какое назначение имеет процессор FEC в составе оптического интерфейса?
15. Какие принципиальные отличия имеют оптические интерфейсы SDH и Ethernet?
16. Сколько стандартов на многоканальные оптические интерфейсы создал МСЭ-Т?
17. Чем отличаются интерфейсы DWDM и CWDM?
18. Сколько типов волокон разработано для многоканальных оптических систем?
19. Чем различаются между собой многоканальные оптические интерфейсы стандартов G.692, G.698, G.959.1?
20. Как влияет скорость передачи в оптическом канале на требуемую полосу частот?
21. Каким техническим решением можно повышать скорость передачи информационных данных в оптическом канале при сохранении его полосы частот и при её уменьшении ?

7. Принципы проектирования оптических транспортных сетей

Проектирование оптической транспортной сети является сложной многопараметрической задачей, результатом решения которой должна быть проектная документация, оформленная по определённым правилам. Проектная документация разрабатывается на основании и в соответствии с заданием на проектирование и исходными данными. В статье 61 Градостроительного кодекса Российской Федерации проектная документация определена как «графические и текстовые материалы, определяющие объёмно-планировочные, конструктивные и технические решения для строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов ...». При этом проекты на транспортные оптические сети не должны содержать принципиальных схем аппаратуры. Составляющие проектируемых узлов связи представляются в виде «черного ящика» с четко определёнными функциями. Однако для комплектации узлов и отдельных образцов аппаратуры рассматриваются общие функциональные структуры аппаратуры.

Согласно федеральному закону «О связи» используемое оборудование должно иметь обязательную сертификацию. Все применяемое активное оборудование, кабели и кабельные изделия, оборудование электропитания, серверы управления и т.д. могут применяться исключительно при наличии соответствующих сертификатов.

При решении задачи проектирования оптической мультисервисной транспортной сети должны выполняться на следующие общие принципы:

- сеть планируется с учетом длительной перспективы (от 5 до 20 лет) ее развития и изменения;
- производится учет специальных условий и требований заказчика (пользователя) транспортной сети;
- предусматривается необходимый уровень эксплуатации транспортной сети и кадровый потенциал;
- определяется существующая и перспективная нагрузка сети с подразделением на виды и объемы предоставляемых услуг (коммутируемые каналы, коммутируемые виртуальные каналы, пакетная передача с заданным качеством и т.д.);
- выбирается оптическая среда передачи и базовые транспортные технологии мультиплексирования (SDH, CWDM, OTN/OTH-DWDM, ATM, Ethernet (PBB/PBT), TP-MPLS);
- производится обоснованный выбор структуры транспортной сети;
- обосновывается использование методов повышения надежности сети через реализацию видов защиты линий и соединений, резервирования оборудования и т.д.;
- разрабатываются схемы: организации связи, организации синхронизации и организации управления;
- рассчитываются передаточные характеристики линейных трактов с учетом коэффициента ошибок или OSNR;

- оптимизируется использование оборудования и линий;
- производится комплектация выбранного оборудования и оценка стоимостных показателей;
- оптимизируется сеть по стоимостным и качественным показателям при сравнении как минимум двух вариантов топологий, оборудования, линейных сооружений и т.д.

Общие принципы проектирования должны определённо трансформироваться на конкретные сети: магистральные, внутризоновые или региональные, сети крупных городов (сети типа «Метро»), местные сети. В каждой из указанных сетей имеются свои специфические особенности: по общей структуре, по конфигурации услуг; по использованию оптической среды и аппаратуры; по масштабированию и перспективному развитию; по организации управления и синхронизации и т.д.

В каждом случае следует обратить внимание на ряд деталей.

Магистральные оптические мультисервисные транспортные сети отличаются большой протяженностью участков оптической передачи (сотни и тысячи километров между крупными узлами). Также они характеризуются использованием рабочих и резервных волоконно-оптических линий связи с различными волокнами в кабеле, применением аппаратуры OTN на основе OTN-DWDM с большим наращиваемым числом оптических каналов (от десятков до сотен с возможностью реализации гибкой сетки волн согласно рек. МСЭ-T G.694.1 для поддержки суперканальных решений на скоростях выше 400 Гбит/с), применением оптических адаптируемых компенсаторов дисперсии, промежуточных оптических усилителей и мультиплексоров ROADM. На магистральной сети должны рассчитываться взаимные влияния оптических каналов в зависимости от числа участков оптической передачи и мощности отдельных каналов с учетом нелинейных свойств волоконных световодов. Должны предусматриваться функции автоматической регулировки мощности каждого оптического канала. Выбираемые для магистральной сети платформы типа Long Haul с CDC (G, S)-ROADM, оптическими усилителями и кроссовыми коммутаторами OXC должны иметь полный набор функций удаленного управления и контроля. Надёжность магистральной сети в значительной степени определяется резервированием линейных сооружений, т.е. дополнительным кабелем, который прокладывается с пространственным удалением от рабочего кабеля на сотни метров и километры, арендой волокон кабеля для резервирования, использованием стволов радиолиний, использованием высоконадежных оптических интерфейсов. С точки зрения структуры магистральной сети предпочтение должно отдаваться ячеистой топологии. Магистральная сеть должна иметь гарантированный, управляемый тактовый синхронизм от первичных генераторов или источников. Все основные узлы аппаратуры магистральной оптической сети должны проектироваться в составе аппаратуры с резервом по схеме 1+1.

Внутризоновые или региональные оптические мультисервисные транспортные сети проектируются, как правило, без промежуточных станций

регенерации и оптического усиления. В этих сетях преимущественно используется структура двухволоконного оптического кольца с передачей Ethernet или SDH, оптические каналы CWDM (до 18λ) с нагрузкой SDH, Ethernet. Для полной реализации режима CWDM могут использоваться волокна G.652C, т.е. с улучшенной характеристикой передачи (без «водяного пика»). При этом функции резервирования могут возлагаться на резервные оптические каналы, на защитные возможности сетей SDH и Ethernet. Кольцевые структуры этих сетей могут проектироваться с взаимным перекрытием соединений различных колец для гарантированной защиты. Также характерной особенностью этих сетей может быть многократный доступ к отдельным оптическим и электрическим соединениям, например, для распределения программ центрального и регионального телевидения, подключения к телефонным станциям, подключения к Интернет, подключения базовых станций мобильной связи и т.д. Оборудование транспортной сети может отличаться от оборудования магистральной сети меньшей стоимостью и, соответственно, упрощенными интерфейсами, упрощенным набором функций передачи WDM, резервирования и управления.

Оптические сети типа «Метро» проектируются в городах – мегаполисах, где существует высокая потребность в услугах оптических мультисервисных сетей, которые называют Triple Play (голос, видео, данные). Как правило, инфраструктура таких сетей реализуется в рамках CEPT (Carrier Ethernet Transport Platform) – агрегирования трафика, распределенное по узлам. Мультисервисные транспортные платформы для сети «МЕТРО» должны содержать оборудование GE (1000 Мбит/с Ethernet), 10GE (10 Гбит/с Ethernet), 40/100GE (40/100 Гбит/с Ethernet) и оптическую защищенную инфраструктуру кольцевой или ячеистой топологии с мультиплексированием CWDM и DWDM. В проекте должны учитываться возможности: по наращивания ёмкости сети волновых каналов, гибкой сетки волн, доступа к этим каналам средствами OADM и CDC-ROADM; наращивания возможностей интерфейсов пользователей услуг; защиты интерфейсов и линий передачи и т.д.

Местные оптические транспортные сети имеют ограниченные расстояния передачи сигналов и строятся на основе активных и пассивных структур. При этом преимущество могут иметь технологии пассивных оптических сетей PON (EPON, GPON, 10/40GPON). Местная оптическая сеть является, как правило, частью сети доступа («первая миля», «последняя миля») и в предлагаемом учебном пособии не рассматривается.

Ещё одной разновидностью *транспортной сети* может быть сеть **технологического назначения**. Такими сетями располагают предприятия электроэнергетики, газовой промышленности, железнодорожного транспорта, предприятия по перекачке нефтепродуктов и некоторые другие. Принципы проектирования технологических сетей аналогичны представленным выше, однако при проектировании должны обязательно учитываться специфические особенности, которые обычно отражены в ведомственных инструкциях и стандартах [20, 21].

8. Принципы автоматизации проектирования транспортных сетей

Автоматизация проектирования оптических мультисервисных транспортных сетей это одна из актуальнейших задач, которую решают проектные организации, привлекая программные продукты Autodesk, Consistent Software, UGS PLM Solutions, MSC Software, BPsim3 и т.д. Производители продукции оптических сетей (Cisco, Alcatel-Lucent-Siemens-Nokia, Ciena, Marconi, T8, Huawei и др.) заботятся о продвижении своих компонентов на рынке телекоммуникаций, предоставляя готовые разработки по управлению проектированием коротких и протяженных оптических линий, по маршрутизации оптических каналов, по средствам защиты сети от повреждений, по проектированию и моделированию сети синхронизации и т.д.

Одной из особенностей автоматизации проектирования оптических сетей стала разработка *комплексных инструментов проектирования*, внедрения и управления в процессе эксплуатации и при модернизации. При этом комплексность касается отдельных сетей, например, сетей типа «Метро» или магистральных сетей типа Long Haul.

Комплексный характер проектирования начинается с уровня услуг (сервиса) и соответствующих интерфейсов и позволяет провайдерам сосредоточиться на определении типов предлагаемых услуг и вопросах доступности благодаря упрощению процесса сравнения альтернативных вариантов услуг и связанных с ними инвестиций.

Необходимо подчеркнуть, что проектирование оптических сетей всегда было сложной многопараметрической задачей из-за природы оптических сигналов, которые основаны на аналоговых технологиях с одной стороны (модуляция оптической несущей и детектирования), и с другой стороны используются для транспортировки цифровых сигналов (STM-N, OTUk). Из-за линейных и нелинейных эффектов необходимо учитывать сразу несколько различных параметров. К линейным эффектам относятся такие, как накопление шумов спонтанной эмиссии, ограничение мощности оптических сигналов, а также хроматическая и поляризационная дисперсия; к нелинейным эффектам относятся перекрестная фазовая модуляция, фазовая автомодуляция и четырехволновое смешение, рамановское и брьюэлленовское рассеяние. Проектирование сетей «метро», региональных и магистральных сетей DWDM с большим числом точек ввода/вывода связано с дополнительными трудностями, так сеть должна обеспечивать работу различных оптических путей, использующих одни и те же оптические компоненты (например, оптические усилители и компенсаторы дисперсии). При этом проектирование и оптимизация сети DWDM – это интерактивный процесс, требующий учета ряда ограничений:

- на расстояния и вносимые потери на участках сети;
- на типы и число услуг, которые должны быть предоставлены в каждой точке, подключенной к сети;
- на количество оптических каналов;
- на величину накопленных искажений и фазовых дрожаний импульсов.

На основании этих ограничений при проектировании оптической сети с WDM необходимо оптимально расположить оборудование в различных узлах сети таким образом, чтобы снизить общую стоимость проекта. При использовании оптических мультиплексоров ввода/вывода (OADM) в различных точках сети, число и тип устройств, установленных в каждом узле, необходимо оптимизировать при проектировании таким образом, чтобы снизить общую стоимость сети. Технология ROADM в сетях DWDM должна обеспечивать полную гибкость структуры трафика. При использовании комплексных инструментов проектирования сетей эта гибкость обеспечивается путем проверки различных оптических путей, существующих в сети. Комплексный характер проектирования касается всех этих проблем.

Автоматизация, связанная с внедрением программного продукта, как инструмента проектирования, помогает пользователям на всех этапах создания сети DWDM – от проектирования до развертывания сети. Ниже перечислены ключевые возможности и функции последнего поколения инструментов автоматизации проектирования.

- Графический интерфейс позволяет оптимизировать проектирование уровня DWDM. При этом, как правило, пользователям доступны различные точки в сети, а не только те, где необходим ввод/вывод трафика. Программа помогает определить тип и количество оборудования, которое должно быть использовано не только в точках ввода/вывода, но и во всех других точках сети. При этом учитывает топологию сетей, типы и протяженность используемого оптического волокна, а также текущие и будущие потребности в отношении трафика.

- Проектирование гибких сетей с возможностью соединения любых точек, используя устройства ROADM, доступных на транспортной платформе.

- Пользователь может также выбрать типы трафика и подключений, которые будут использоваться для маршрутизации трафика между узлами, что позволяет создать сеть с поддержкой соединения между любыми точками. Т. о., пользователь получает возможность учитывать различные сетевые сценарии и снизить общую стоимость сети.

- Пользователь может просто выбрать тип услуги, необходимой клиенту, или напрямую указать, что для предоставления какой-либо услуги должно использоваться определенное устройство. Благодаря гибкости транспортной платформы и возможностям инструмента проектирования пользователи могут оценить стоимость различных вариантов реализации сети.

- Возможность изменения проекта сети (называется «дельта-планирование») – одна из наиболее полезных возможностей для пользователей транспортной платформы. Это возможность оценить и определить необходимые изменения в проекте существующей сети при ее масштабировании и модернизации. Технология «дельта-планирования» позволяет пользователям добавлять или удалять узлы ROADM (и фиксированные OADM) из проекта, добавлять поддержку новых услуг, а также

изменять параметры гибкости существующей или планируемой сети. «Дельта-планирование» также обеспечивает полный набор возможностей по составлению отчетов, что позволяет быстро определить, что именно необходимо изменить и где, на уровнях сети и узлов.

- Полная спецификация используемых материалов для узлов и сети – общая стоимость остается одним из наиболее важных параметров при проектировании оптических сетей. Некоторые продукты автоматически синхронизируют цены на каждое отдельное устройство с web-сайтом и на основании этих данных создают полные спецификации используемых материалов для всей сети и каждого отдельного узла. Эта информация может использоваться при оценке различных сценариев реализации сети, с возможностью задания различных вариантов и ограничений для проекта.

К примерам продуктов полной автоматизации проектирования оптических сетей можно отнести:

- OptiSim T8, для проектирования оптической сети на основе комплекса оборудования ВОЛГА (www.t8.ru);
- Cisco Transport Planner, используется совместно с транспортной мультисервисной платформой ONS 15454 MSTP [94] (рис.8.1);
- MERITON 9500 NPT (NETWORK PLANNING TOOL);
- Alcatel 1354, используется совместно с интеллектуальными транспортными платформами 1626LM, 1678MCC , 1850TSS;
- Siemens Turn-up & Optimization для оптической платформы SURPASS hiT 7550.

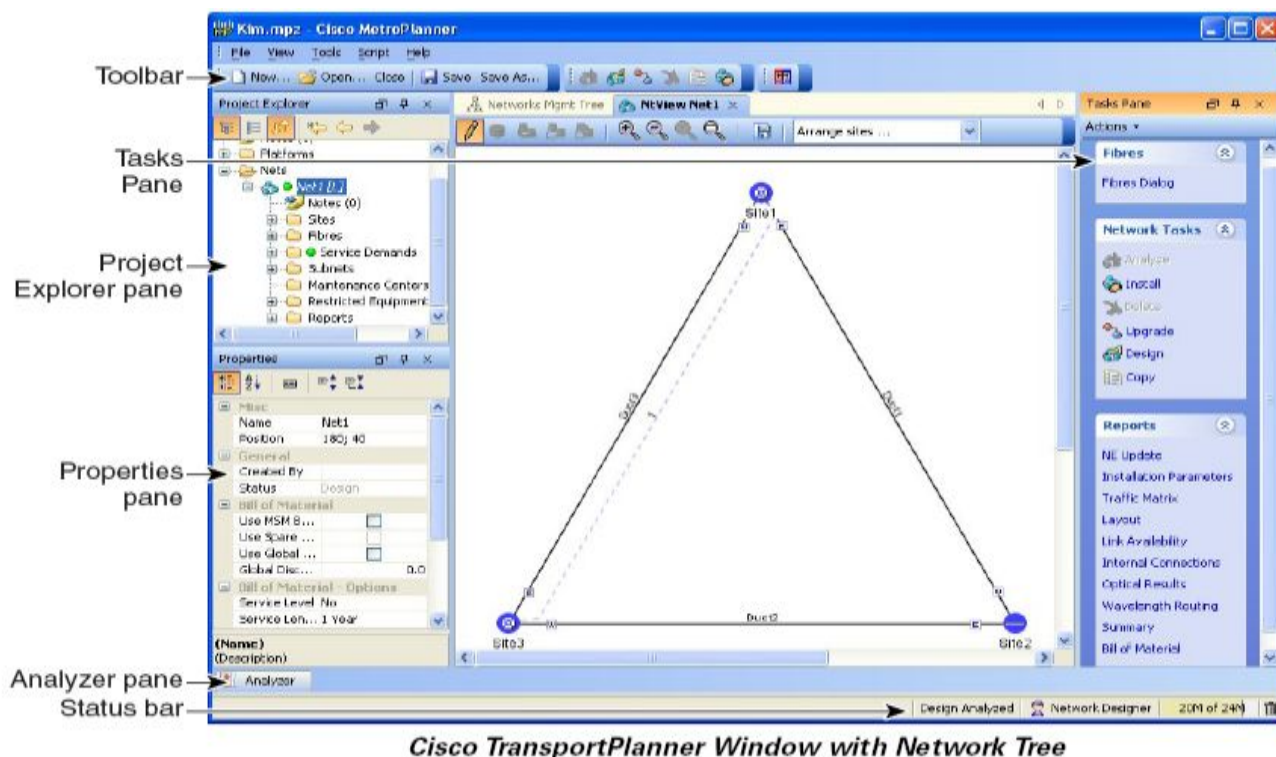


Рис.8.1. Пример окна программы Cisco Transport Planner

9. Порядок выполнения курсового проекта и примеры проектных решений

Перед выполнением курсового проекта необходимо внимательно ознакомиться с основными этапами и методикой по каждому этапу отдельно. Каждый этап выполняется в виде отдельной главы или раздела пояснительной записки проекта. В начале проекта должно быть представлено оглавление (с указанием страниц глав, разделов, приложений и т.д.) и введение. Завершается проект заключением, приложениями и списком литературы. Общий объем проекта должен быть в пределах 50 - 60 страниц (без учета приложений) формата А4 с текстовым набором Times New Roman 14, через 1 интервал. Размеры отступа при печати: слева 2 см, справа 2 см, верх и низ по 2 см. Таблицы и рисунки выполняются в соответствии с действующими ГОСТ и внутривузовским положением по оформлению курсовых и дипломных проектов.

9.1. Основные этапы выполнения курсового проекта

1. Изучение технического задания (ТЗ) на курсовой проект.
2. Определение на географической карте (карте автодорог) мест расположения узлов связи в населенных пунктах и внутри городов (при выполнении проектов транспортных сетей в мегаполисах), и предполагаемых трасс прокладки кабельных линий.
3. Расчет требуемых эквивалентных ресурсов транспортной сети, т.е. скорости цифровых потоков, числа оптических каналов (поддерживающих модулей, транспондеров и мукспондеров), числа волокон в кабеле в направлениях согласно ТЗ.
4. Представление вариантов топологий транспортной сети (не менее 2-х) и их сравнительный анализ по условиям прокладки кабельных линий, по количеству требуемых мультиплексоров, по длине кабеля, по вариантам защиты линий и пользовательских соединений.
5. Представление на схемах всех рассмотренных вариантов топологий транспортной сети с учетом эквивалентных ресурсов (оптических соединений) (по пункту 3) и ресурсов для защиты линий и соединений.
6. Представление таблицы (таблиц) итоговых расчетов ресурсов на каждом из участков сети (оптические волокна, оптические каналы, стандартные цифровые потоки соответствующих технологий).

7. Определение требуемых видов мультиплексоров (по технологиям: SDH, OTN-OTN-WDM, Ethernet, ATM и др., по применению: терминальные, ввода/вывода, кроссовые коммутаторы) и их количества в каждом из узлов связи по сравниваемым вариантам. Выбор оптимального варианта по критериям минимального объема оборудования, минимального энергопотребления, минимальных массогабаритных показателей, минимальных длин кабельных линий.
8. Выбор аппаратуры предлагаемого по ТЗ производителя и кабельной продукции для соответствующей прокладки (в грунт, в кабельную канализацию, на подвеску).
9. Обоснованный выбор способов защиты: линий связи, секций передачи и мультиплексирования, соединений трактов, аппаратуры на основе технических данных. Обоснование строится исходя из реальных характеристик выбранной аппаратуры и топологии сети.
10. Расчет оптических линейных участков одноканальной передачи (секций регенерации, усиления и мультиплексирования) на предмет соответствия затухания, дисперсии допустимым для стандартных интерфейсов с заданным показателем коэффициента ошибок и многоканальных оптических (CWDM и DWDM) канальных сигналов (секции усиления многоканальной оптической передачи и оптического мультиплексирования) на предмет выполнения требования OSNR.
11. Конфигурации мультиплексоров в каждом узле транспортной сети с учетом требуемых пользовательских (компонентных) интерфейсов, линейных (агрегатных) интерфейсов, устройств кроссовой коммутации, устройств защитных переключений, устройств синхронизации, устройств управления, устройств электропитания.
12. Разработка схемы организации связи на основе конфигурации оборудования в каждом узле проектируемой сети с детальным отображением отдельных видов оборудования.
13. Разработка схемы синхронизации цифровых устройств транспортной сети (мультиплексоров SDH/PDH, OTN, ATM, Ethernet и т.д.).
14. Разработка схемы управления транспортной сетью с указанием размещения серверов управления, каналов передачи данных, терминалов управления и контроллеров управления (ASON/T-SDN).
15. Выбор необходимых контрольно-измерительных приборов и тестового оборудования протоколов и интерфейсов.

16. Расчет потребления электроэнергии оборудованием транспортной сети и выбор источника электропитания.

17. Подробная комплектация оборудования (карты, корзины, стойки, пассивные электрические и оптические кроссы) в каждом узле транспортной сети, включая промежуточные станции оптического усиления, оптической регенерации, регенерации электрических сигналов, оборудование электропитания.

18. Схема прохождения оптических и электрических цепей в цехе заданного узла транспортной сети.

19. Оформление пояснительной записки курсового проекта с введением, основной содержательной частью пояснительной записки из 18 разделов со схемами, таблицами и рисунками, заключением, приложением с необходимыми техническими характеристиками аппаратуры и кабеля, списком литературы.

20. Вопросы экономики проектирования оптических сетей являются отдельной темой для исследований и не входят в обязательные разделы учебного проекта, но могут рассматриваться дополнительно для более обоснованных решений с различными вариантами построения схем организации связи [101].

9.2. Методические указания к отдельным этапам выполнения курсового проекта

9.2.1. Изучить техническое задание на курсовой проект

Техническое задание на курсовой проект по дисциплине (пример) Оптические мультисервисные сети

Студенту _____ группы _____ Вариант № _____

1. **Разработать участок оптической мультисервисной транспортной сети** между пунктами А, Б, В, Г,....., выбрать структуру сети с учетом возможности защиты информации. Выбрать оптический кабель, системы передачи и оборудование. Рассчитать участки передачи. Разработать схемы: организации связи, синхронизации, управления и прохождения оптических и электрических цепей в ЛАЦ. Привести комплектацию оборудования. Составить подробную пояснительную записку.

2. Направления передачи и информационная нагрузка

№№ П/П	Направления организуемых соединений	Информационная нагрузка					
		E1	E3	STM- 16	Ethernet 1GE	Ethernet 10G	Ethernet 100G
1	А-Б	21	2	1	1		1
2	А-В	21	0	1	1	1	
3	А-Г	21	3	0	1		1
4	А-Д	21	0	0	4	1	
5	---						
6	---						

Наименования пунктов:

А Саратов _____, Б Калининск _____, В Балашов _____,
Г Ртищево _____, Д Аткарск _____, Е Аркадак _____,
Ж _____, З _____, И _____

3. Распределение волокон оптического кабеля: G.652/G.655

№№ п/п	Направление	Число волокон по типам в (%) от общего числа				
		Основные	Резервные	Местные сети	Для аренды	Другие цели
1	А-Б-В	20/20	20/20	10/0	10/0	0/0
2	В-Е	0/0	0/0	10/0	10/0	0/0
3	В-Г	50/0	20/0	10/0	10/0	10/0
4

4. Дополнительные указания:

4.1. Производитель оборудования на выбор T8, СуперТел, Huawei, Cisco, Ciena.....

4.2. Подключение к источникам синхросигналов в пунктах _____ А _____

4.3. Узлы управления сетью находятся в пунктах _____ А _____

4.4. На участках _____ А-Г _____ имеются ЛЭП и электрофицированные железные дороги.

4.5. На участках А-В, Б-В проложены оптические кабели с волокнами типа G.652, G.653, G.654, G.655, G.656, свободных волокон 2 .

4.6. На участках А-Б, Б-В находятся в эксплуатации ЦРРЛ. Свободных стволов НЕТ.

4.7. Узел для разработки схемы прохождения оптических и электрических цепей в ЛАЦ - А.

5. Рекомендуемая литература для выполнения проекта:

5.1. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети. Учебное пособие. Новосибирск, СибГУТИ, 2015.

5.2. Фокин В.Г. Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети. Учебное пособие. Новосибирск, СибГУТИ, 2019.-241с.

.....

6. Рекомендуемый график выполнения проекта:

№ п/п	№ учебной недели	Наименование/номер этапа проектирования	Отметка о выполнении этапа
1	2	Выдача задания, определение порядка отчётности	
2	4	Контроль этапов 1 - 4	
3	6	Контроль этапов 5 - 8	
.....	

Руководитель _____ / Ф.И.О. /

9.2.2. Сделать копию карты местности, где проектируется строительство оптической транспортной сети (пример на рис. 9.1). Карта должна иметь масштабные метки или отметки расстояний по автомобильным или железным дорогам. Отметить на карте населенные пункты и возможные трассы прокладки кабельных линий между ними.

Трасса прокладки кабельной линии выбирается с учетом дополнительных указаний ТЗ. Предпочтение отдается направлению вдоль автодорог, либо вдоль железных дорог на расстоянии не менее 20 метров от ж.д. Это обусловлено необходимостью круглогодичного обслуживания кабельной линии. Оптический кабель может также быть подвешен на опорах линий электропередачи (ЛЭП),

на опорах контактной или сигнальной сети железных дорог. В городах оптический кабель прокладывается в подземную кабельную канализацию, в коллекторах, в метрополитене, подвешивается на опоры ЛЭП, на опоры городского освещения, на опоры контактных сетей электротранспорта и на стояки радиофикации. Строительные длины кабеля (от 4 км до 6 км) сращиваются в оптических муфтах. Муфты должны защитить сстыковки на длительный срок от всех неблагоприятных факторов (механических повреждений, влаги, деформаций от температурных перепадов и т.д.)



Рис. 9.1. Пример копии карты автодорог района проектирования оптической сети и трасса прокладки кабеля

9.2.3. Расчет требуемых эквивалентных ресурсов транспортной сети (скорости цифровых потоков, числа оптических каналов, числа волокон в кабеле) в направлениях согласно ТЗ может производиться отдельно для цифровых потоков пользователей и оптических каналов технологий DWDM и CWDM.

Что следует понимать под эквивалентными ресурсами оптической транспортной сети?

- Эквивалентное число потоков 2,048 Мбит/с в системах передачи SDH и в некоторых видах оборудования Ethernet (например, мультиплексоры ToPGATE ELTEX https://eltex-co.ru/catalog/optical_mux/topgate-24e1-2fg/) с учетом схемы мультиплексирования этих потоков в VC-12 (1 поток), VC-3 (21 поток через VC-12 или 16 потоков через мультиплексирование PDH в E3 34,368 Мбит/с), VC-4 (63 потока через VC-12 или 64 потока через мультиплексирование PDH в E4 139,264 Мбит/с) и от 4E1 до 24E1 в поток GEthernet или 10GEthernet

оборудования ToPGATE. Определение эквивалента потоков на скорости 2.048 Мбит/с необходимо для определения уровня иерархии SDH, т.е. STM-N (N=1, 4, 16, 64, 256) или Ethernet (1 Гбит/с, 10 Гбит/с, 40 Гбит/с, 100 Гбит/с) на участке между узлами сети. Эквивалентные ресурсы сети SDH можно представить количеством STM-N по каждому направлению. Эквивалентные ресурсы сети Ethernet можно представить количеством максимальных по скорости потоков по каждому направлению с учётом мультиплексирования E1 и других менее скоростных потоков (например, 10 Мбит/с, 100 Мбит/с), например, 1 поток GE с 24E1 объединяется с 6GE в общий поток 10GE (рис.9.2).

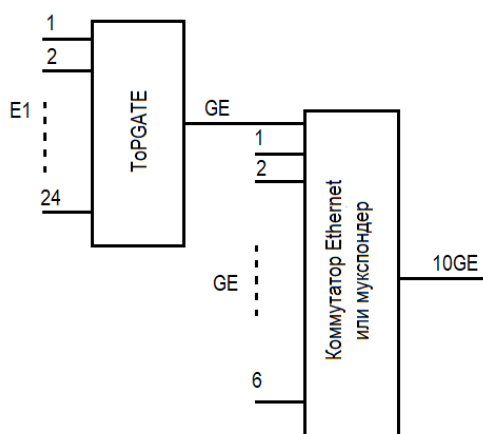


Рис. 9.2. Объединение цифровых потоков для определения эквивалентных ресурсов в сети Ethernet

Эквивалентное число виртуально сцепленных контейнеров в сети SDH, т.е. VC-m/n-Xv (например, VC-12-Xv, где X=1.....63, см. табл.1.1). Определение этого вида эквивалента также необходимо в сети SDH для определения уровня иерархии STM-N, но для нагрузок со скоростными режимами, которые не вписываются оптимально в скоростные режимы VC-12, VC-3 и VC-4, например, когда необходимо организовать пользовательское соединение на скорости 1Гбит/с Ethernet, то объединяются 7VC-4 , или объединить 5VC-12 для пользовательского соединения на скорости 100 Мбит/с Ethernet.

- Эквивалентное число оптических каналов OCh определяется отдельно для систем передачи CWDM и DWDM. В это число должны входить рабочие и резервные OCh, т.е. каналы для защиты оптических соединений.

Системы передачи CWDM применяют на местных и внутризоновых сетях, как правило, с однопролётными участками без промежуточной регенерации и с возможностью усиления сигналов на протяженных участках, при этом возможно использование мультиплексоров OADM для доступа к отдельным каналам (обычно 1-2 фиксированных по длине волны канала). Эквивалентное число каналов OCh между двумя терминальными оптическими мультиплексорами или между OADM не превышает 18 OCh согласно рекомендации G.694.2 МСЭ-Т. Каждый канал OCh может переносить трафик на скорости от 100 Мбит/с (Fast Ethernet), 1.25 Гбит/с (GbEthernet), 2.5 - 2.7 Гбит/с

(STM-16, OTU-1) и 10 Гбит/с (STM-64, OTU-2, 10GE). Возможности оптических интерфейсов CWDM приведены в приложении 3.

Системы передачи DWDM применяются на магистральных транспортных сетях и на сетях типа «Метро» с однопролетными и многопролетными участками с оптическими усилителями и мультиплексорами ROADM. Эквивалентное число каналов на каждом участке между мультиплексорами может быть от одного OCh и до нескольких сотен согласно рекомендации G.694.1 МСЭ-Т с фиксированными волнами (интервал между волнами: 0,1 нм; 0,2 нм; 0,4 нм; 0,8 нм) и гибкой сеткой волн с частотным интервалом волн 6,5 ГГц или 12,5 ГГц. Каждый канал OCh может переносить трафик на скорости от 2,5 Гбит/с (OTU-1) до 120 Гбит/с (OTU-4) (возможно до 400 Гбит/с для OTU-5 на 2-х волнах). Оптические каналы сети OTN-OTN объединяются в оптические транспортные модули OTM-n.m с числом каналов $1 \leq n \leq 32$. При этом возможно использование виртуальных сцепок блоков OPUk-Xv (для k=1, 2, 3) для размещения нестандартных по скорости цифровых потоков в каждом OCh и сцепки OCh в пределах OTM-n.m. Кроме того, каналные транспондеры могут выполнять функции концентраторов (агрегаторов) потоков нагрузки, например, потоки 10 портов 1000BASE-SX могут концентрироваться в один оптический порт 10Gb DWDM (рис.1.1). При этом возможна агрегация различных потоков, например, в оптический канал на скорости 100 Гбит/с можно объединить до 10 STM-64 или до 10 10GE, или их смешение, но, в общем, не более 10. Т.о., эквивалентным ресурсом оптических каналов можно считать цифровые потоки данных на скоростях от 100 Мбит/с до 100 Гбит/с и блоки OPUk, ODUk, OTUk, и модули OTU-n.m.

При выполнении курсового проекта на этапе определения эквивалентных ресурсов транспортной сети рекомендуется учитывать по каждому из заданных направлений (см. задание, А-Б, А-В,...) концентрирующие свойства компонентных портов отдельных мультиплексоров (SDH, Ethernet, ToPGATE и др.) и мукспондеров оптических каналов для трафика циклической и пакетной передачи. В дальнейшем это облегчит выбор необходимого оборудования. После выбора оборудования можно будет учесть концентрирующие возможности и скорректировать эквивалентный ресурс (цифровые потоки, транспондеры, мукспондеры и оптические волны) под конкретные устройства.

- Эквивалентное число волокон в оптическом кабеле определяется по ТЗ (в примере задания п.3). Минимальное число волокон, требуемых для организации связи - 2 и им должно соответствовать минимальное число в % представлении, например, 10/10 (в %) обозначает, (2 волокна с характеристиками G.652)/(2 волокна с характеристиками G.655). Тогда полная емкость кабеля составит 20 волокон, из которых 10 волокон G.652 и 10 волокон G.655. Необходимо обратить внимание на то, что возможна организация системы передачи по одному волокну с использованием различных длин волн для встречной передачи (например, на волнах 1310 нм и 1550 нм, или на волнах CWDM, как предусмотрено стандартными

интерфейсами в приложении 3). Такая возможность обычно указывается производителем оборудования.

Пример (по табл. ТЗ) определения эквивалентного ресурса оптической транспортной сети по отдельным направлениям представлен в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Пример определения суммарного эквивалента нагрузки по направлениям для проектируемой транспортной сети

№	Направление	Тип информ. нагр.	Скорость	Ко-во	Эквивал. ресурс	Возможн. агрегации	Ко-во TPD, MxPD	Ко-во волн OCh	Всего волн OCh
1	А-Б	E1	2,048Мбит/с	21	21VC-12	2STM-64 в 2OTU2 или 2OTU2 в OTU3	2TPD или 1MxPD	2 или 1	3 или 2
		E3	34,368Мбит/с	2	42VC-12				
		STM-16	2,5Гбит/с	1	1024VC-12				
		GE	1 Гбит/с	1	7VC-4				
		10GE	10Гбит/с	1	64VC-4 или OTU2				
		100GE	100Гбит/с	1	OTU4	OTU4	1TPD	1	
2	А-В	E1	2,048Мбит/с	21	21VC-12	2STM-64 в 2OTU2 или 2OTU2 в OTU3	2TPD или 1MxPD	1	2
		STM-16	2,5Гбит/с	1	1024VC-12				Или
		GE	1Гбит/с	1	7VC-4			1	1
		10GE	10Гбит/с	1	64VC-4 или OTU2				
3	А-Г	E1	2,048Мбит/с	21	21VC-12	STM-64 в OTU2	1TPD	1	2
		E3	34,368Мбит/с	3	63VC-12				
		GE	1Гбит/с	1	7VC-4				
		100GE	100Гбит/с	1	OTU4	OTU4	1TPD	1	
4	А-Д	E1	2.048Мбит/с	21	21VC-12	STM-16 в OTU1	1TPD	1	2
		GE	1Гбит/с	4	4x7VC-4				
		10GE	10Гбит/с	1	64VC-4 или OTU2	OTU2	1TPD	1	

Из таблицы видно, что отдельные направления передачи в транспортной сети можно организовать через различные ресурсы: одноканальной оптической передачей в сети SDH (STM-16/64, при этом возможна организация одного оптического канала OCh с доступом в каждом узле для выделения нагрузки по направлению) и многоканальной оптической передачей (по несколько волн для каждого или агрегированного информационного потока) в каналах OCh (соединение типа «точка-точка» без доступа к ним в транзитных узлах). Данные таблицы в дальнейшем необходимы для выбора подходящих транспондеров и мукспондеров конкретного производителя оборудования.

9.2.4. Представление вариантов топологий транспортной сети

Рассматриваются не менее 2-х вариантов топологии (см. раздел 3), например, «точка-точка» и «кольцо». Изобразить обе топологии на отдельных

рисунках (примеры на рис.9.3 и 9.4). Рассчитать число эквивалентных ресурсов на каждом участке сети и тем самым определить емкости линейных трактов между узлами сети в соответствующих эквивалентах (SDH, Ethernet или OTN-OTN), но не менее 2-х, например, на основе данных табл.9.1 (STM-N/OTUk или OCh). Результаты расчетов представить в виде таблиц (пример табл.9.3 и 9.4). В графе «Выбор защиты» указать предполагаемый вариант защиты соединений трактов или линий (см. раздел 4), учесть указания ТЗ п.4 относительно возможности использования существующих оптических кабельных и радиорелейных линий для резервирования.

При определении топологии магистральной транспортной сети необходимо учесть, что магистральные оптические кабели прокладываются в обход крупных городов. Вблизи этих городов (на расстоянии 60 - 100 км) строятся сетевые узлы, где размещается оборудование систем передачи и коммутаторы. От сетевых узлов прокладываются отдельные защищенные кабельные линии к узлам связи крупных городов (областных или республиканских центров).

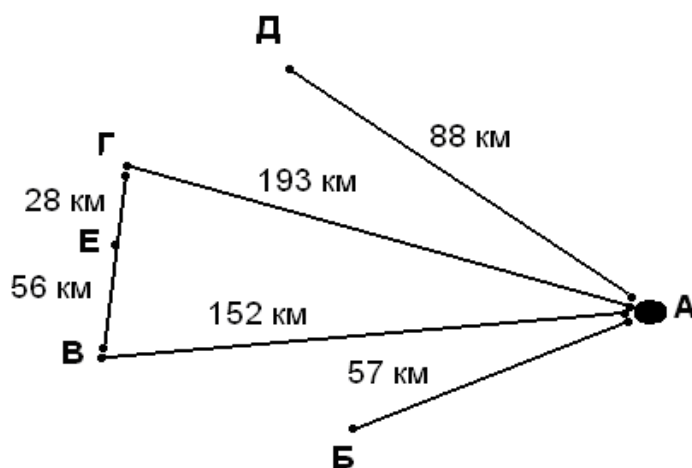


Рис. 9.3. Пример топологии сети с отдельными кабельными линиями (точка-точка)

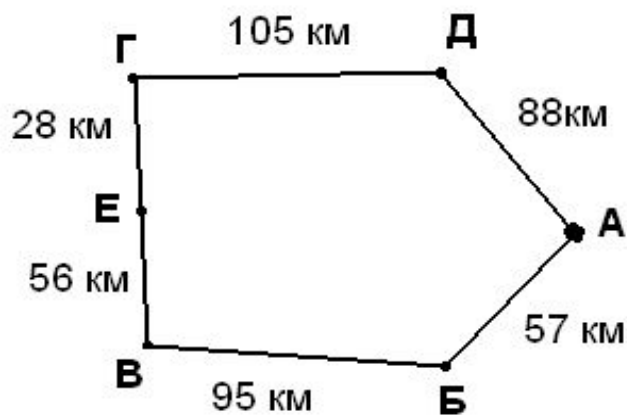


Рис. 9.4. Пример топологии сети с замкнутой в кольцо цепью кабельных линий

Таблица 9.2. Пример эквивалентной емкости в сети с соединением «точка-точка»

	Направление	Эквивалентная емкость		Длина кабеля	Выбор защиты	Эквивалентная емкость с учетом защиты/переключения на резервный кабель	
		OTUk	OCh			OTUk	OCh
1	А-Б	2OTU2 и OTU4, или OTU3 и OTU4	3 или 2	57 км	Кабель 1+1	2OTU2 и OTU4, или OTU3 и OTU4	3 или 2
2	А-В	2OTU2 или OTU3	2 или 1	152 км		2OTU2 или OTU3	2 или 1
3	А-Г	OTU2/OTU4	2	193 км		OTU2/OTU4	2
4	А-Д	OTU1/OTU2	2	88 км		OTU1/OTU2	2
	Итого для п. А	1OTU1/6OTU2/2OTU4 или 1OTU1/2OTU2/2OTU3/2OTU4	9 или 7	1148 км с учётом волокон для защиты в резервном кабеле		1OTU1/6OTU2/2OTU4 или 1OTU1/2OTU2/2OTU3/2OTU4	9 или 7

Таблица 9.3. Пример эквивалентной емкости в сети с соединением «кольцо»

	Направление	Эквивалентная рабочая емкость		Длина кабеля	Выбор защиты, SDH/OTN	Эквивалентная емкость с учетом защиты/переключения на резервные соединения	
		OTUk	OCh			OTUk	OCh
1	А-Б	1OTU1, 6OTU2, 2OTU4 или OTU1, 2OTU2, 2OTU3, 2OTU4	9 или 7	57	2F MS-SPRing/OMS-DPRing	1OTU1, 6OTU2, 2OTU4 или OTU1, 2OTU2, 2OTU3, 2OTU4	9 или 7
2	Б-В	OTU1, 4OTU2, OTU4 или OTU1, 2OTU2, OTU3, OTU4	6 или 5	95		OTU1, 4OTU2, OTU4 или OTU1, 2OTU2, OTU3, OTU4	6 или 5
3	В-Г	OTU1, 2OTU2, OTU4	4	84		OTU1, 2OTU2, OTU4	4
4	Г-Д	OTU1, OTU2	2	105		OTU1, OTU2	2
5	Д-А	Нет рабочих соединений		88	Резервная способность А-Б и любой ёмкости рабочих каналов		
	Итого для п.А	1OTU1, 6OTU2, 2OTU4 или OTU1, 2OTU2, 2OTU3, 2OTU4	9 или 7	429 км	Отдельных волокон в другой кабельной линии для защиты не предусмотрено. Защита каждого оптического канала в обход повреждённой секции.		

9.2.5. Представление на схемах рассмотренных вариантов топологий

В соответствии с рисунками и таблицами п.9.2.4 представить схемы не менее двух вариантов рассматриваемых топологий транспортной сети с учетом эквивалентных ресурсов и ресурсов для защиты линий и соединений. На схемах должны быть отдельно отмечены рабочие и защитные соединения (кабельные линии, оптические каналы, цифровые тракты). Примеры представлены на рис.9.5 и 9.6. Пунктирными линиями показаны резервные ресурсы (оптический кабель, оптические каналы и цифровые тракты).

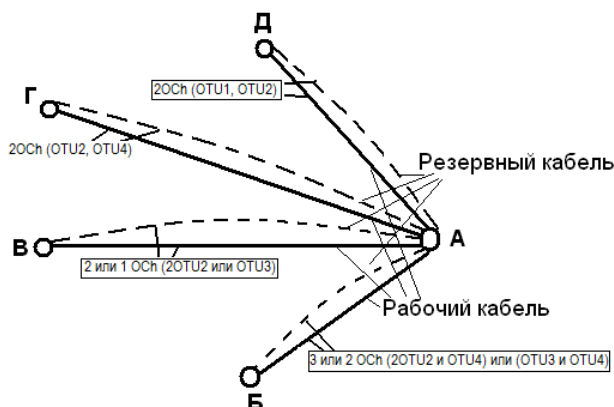


Рис. 9.5. Пример распределения ресурсов транспортной сети в соединениях «точка-точка» при использовании технологии OTN/OTH

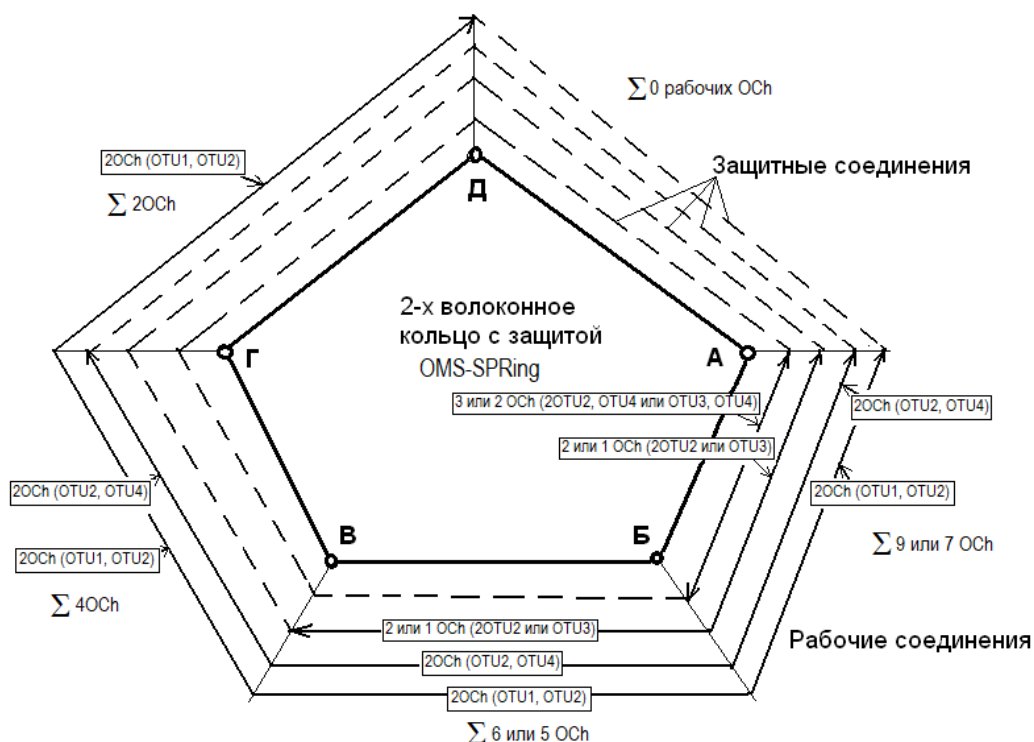


Рис. 9.6. Пример распределения эквивалентных ресурсов транспортной сети в «кольце» при использовании технологии OTN/OTN

Необходимо обратить внимание на решения по защите в кольцевой топологии. На примере рис. 9.5 пунктиром отмечены резервные ресурсы отдельных соединений (цифровые тракты или оптические каналы), которые равны по своей емкости рабочим ресурсам. Переключение на защитные соединения может происходить в линейной сети автоматической коммутацией волокон или ручным способом на кроссе сразу всех каналов по поврежденным направлениям по парам узлов, например, А-Б, А-В,... Переключение на защитные соединения в кольцевой сети также может происходить автоматически или в ручном режиме (например, на узле А), но для каждого оптического канала отдельно и по парам узлов (А-Б, А-В,...).

9.2.6. Определение требуемых видов мультиплексоров и их количества

В транспортной сети, построенной на соединениях типа «точка-точка» требуются только терминальные мультиплексоры и, возможно, различных иерархических уровней. При этом число мультиплексоров равно удвоенному количеству связей типа «точка-точка». Например, из табл. 9.4 видно, требуется 8 мультиплексоров DWDM на стандартную ёмкость в пределах 16 оптических каналов каждый и минимум 5 универсальных мультиплексоров STM-N с портами от E1 до STM-64 .

В транспортной сети кольцевого типа SDH могут использоваться мультиплексоры ADM одного иерархического уровня. Например, ROADM с соответствующими транспондерами в оптическом канале ADM STM-64 (рис.9.7). Их общее количество равно количеству узлов связи (в рассматриваемом примере 5ROADM и 5ADM).

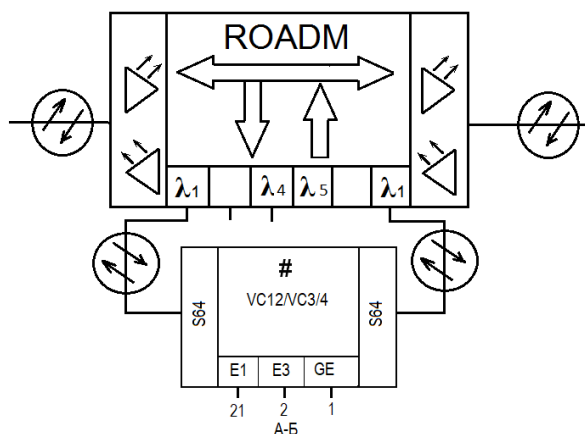


Рис. 9.7. Пример узла оптической сети с доступом к оптическому каналу с нагрузкой STM-N (64)

В транспортных сетях смешанных конфигураций возможно использование всех известных видов оборудования, включая кроссовые коммутаторы, оптические усилители, оптические и электрические регенераторы и т.д.

В курсовом проекте необходимо представить таблицу (см. пример табл.9.4) как минимум с двумя вариантами требуемых видов мультиплексоров (оптическими и электрическими) и их количеством и принять окончательное решение по топологии сети и технологии её реализации, указав в обосновании и длины кабельных линий.

Таблица 9.4. Пример определения количества и видов мультиплексоров

Варианты топологий, технологий и число мультиплексоров		Проектируемые узлы оптической транспортной сети				
		А	Б	В	Г	Д
Точка-точка	SDH/Ethernet, всего 8	TM:4	TM:1	TM:1	TM:1	TM:1
	OTN, всего 8	OTM:4	OTM:1	OTM:1	OTM:1	OTM:1
Кольцо	SDH/Ethernet, всего 5	ADM: 1 STM-64	ADM: 1 STM-64	ADM: 1 STM-64	ADM: 1 STM-64	ADM: 1 STM-64
	OTN, всего от 5	ROADM 1	ROADM 1	ROADM 1	ROADM 1	ROADM 1

9.2.7. Выбор аппаратуры и кабельной продукции

Для выбора подходящей аппаратуры необходимо руководствоваться 4 пунктом задания (дополнительные указания), где отмечается производитель (например, T8), и техническими характеристиками аппаратуры указанного производителя. Для получения технических характеристик рекомендуется использовать возможности ИНТЕРНЕТ по доступу к сайтам производителей и выбору новейших образцов аппаратуры. Внимательно изучить их возможности относительно проектируемой сети. Следует обратить внимание на возможности оптических мультисервисных транспортных платформ. Необходимо привести и сравнить характеристики как минимум двух образцов аппаратуры одного производителя. Необходимо помнить, что в проекте может быть задействовано несколько образцов аппаратуры для получения требуемых компонентных (пользовательских) интерфейсов (например, полки расширения, мультиплексоры - концентраторы трафика), для формирования линейных сигналов (например, CWDM или DWDM) и т.д. Сайты некоторых известных производителей аппаратуры: www.t8.ru, <http://www.supertel.ru>, www.advaoptical.com, www.alcatel-lucent.com, www.ciena.com, www.cisco.com, www.eci.ru, www.huawei.com, www.marconi.com, www.meriton.com, www.nec.ru, www.siemens.com, www.tellabs.com, www.utistar.com и т.д.

При выборе кабельной продукции необходимо точное определение способа прокладки кабеля (в грунт, в кабельную канализацию, на подвеску и т.д.). Также при выборе поставщика кабельной продукции нужно учитывать географическое положение проектируемого объекта, наличие автомобильных и железных дорог между поставщиком кабеля и объектом строительства, т.к. это

определяет время и стоимость доставки кабеля. Широкий спектр кабельной продукции представлен на сайте / www.ruscable.ru/ .

9.2.8. Обоснованный выбор способов защиты: линий связи, секций передачи, соединений трактов, аппаратуры

Обоснование строится исходя из реальных характеристик выбранной аппаратуры и топологии сети.

Защита линии связи может быть обеспечена прокладкой дополнительного (резервного) кабеля с подключением его волокон к резервным агрегатным портам мультиплексоров. Также защита линии связи возможна при использовании отдельных волокон существующих кабельных линий, в том числе и альтернативных операторов связи. Для защиты многоканального (многоволнового) оптического соединения необходимо предусмотреть оптический коммутатор, который обеспечит переключение приёмной стороны с неисправного на исправное оптическое волокно (пример схемы на рис.4.6).

Защита секций передачи (секции мультиплексирования SDH, DWDM и CWDM) и **соединений трактов** может осуществляться одним из способов, рассмотренных в разделе 4 учебного пособия. Необходимо в курсовом проекте однозначно предложить вариант защиты линий связи, секций передачи и соединений трактов *исходя из данных на выбранное оборудование* заданного производителя. Возможно совмещение видов защиты, например, в 4-х волоконных кольцевых топологиях это защита линии связи за счёт использования резервных волокон и защита соединений секции мультиплексирования за счет использования резервных оптических каналов WDM или цифровой ёмкости STM-N.

Для **защиты аппаратуры** должны быть предусмотрены резервные блоки в составе аппаратуры и в составе ЗИП. Защита наиболее ответственных узлов аппаратуры выполняется, как правило, по схеме 1+1 (кроссовые коммутаторы, тактовые генераторы, агрегатные интерфейсы и т.д.), т.е. на каждый рабочий блок приходится резервный блок, который функционально дублирует рабочий блок. Другие блоки аппаратуры могут иметь резерв не всегда доступный, т.е. 1:N, где N=2, 3, 4.... – число рабочих блоков, на которые приходится только один резервный блок. В этом случае возможно использование приоритетов защиты.

9.2.9. Расчет участков передачи одноканальных и многоканальных оптических сигналов

Расчет участков передачи одноканальных (секции регенерации и мультиплексирования) и многоканальных оптических (CWDM и DWDM) сигналов (секции многоканальной оптической передачи и оптического мультиплексирования) необходимо выполнить по стандартным методикам, изложенным в [1, 3, 4, 5, 10, 61, 80, 95] и в главе 6, подробно в примерах

приложения 6. При этом необходимо использовать точные технические характеристики интерфейсов выбранной аппаратуры и оптических кабелей. Необходимо обратить внимание на учет поляризационной модовой дисперсии (ПМД) на протяженных участках связи и уменьшение мощности сигнала в оптическом канале из-за поляризационных потерь в линии и промежуточных сетевых элементах, на возможности интерфейсов с упреждающей коррекцией ошибок (FEC), которая может обеспечить дополнительный энергетический выигрыш 3-12 дБ. В линейных трактах с WDM необходимо полностью учесть полосу частот оптического канала, число оптических каналов и мощности сигналов при определении OSNR. НЕОБХОДИМО рассчитать и построить диаграмму уровней передачи, по крайней мере, двух оптических каналов (когерентного и некогерентного типов) на самом протяженном участке с наибольшим количеством промежуточных оптических усилителей. Расчетами и диаграммой уровней показать, что требуемое значение OSNR (по данным от производителя) будет выполняться. Расчетами также необходимо показать, что остаточная дисперсия при использовании компенсаторов не превзойдет допустимое значение в некогерентном оптическом канале. В когерентном оптическом канале сравнить допустимую дисперсию по данным транспондера/мультиплексиона с рассчитанным значением.

По итогам выполнения этого раздела должна быть представлена таблица с указанием длин участков передачи (между мультиплексорами каждой секции, между оптическими усилителями или регенераторами), расчетных значений затухания и дисперсии, OSNR, типов предлагаемых интерфейсов аппаратуры, компенсаторов дисперсии, аттенюаторов, мест размещения промежуточных необслуживаемых станций с усилителями или регенераторами. Необходимо учесть, что необслуживаемые станции должны размещаться в населенных пунктах, обеспеченных надежными источниками электропитания и где возможно безопасное размещение оборудования (энергоподстанции, местные узлы связи, административные здания и т.д.).

9.2.10. Конфигурации мультиплексоров

Конфигурации мультиплексоров в каждом узле транспортной сети должны быть составлены и изображены на отдельных рисунках с учетом требуемых пользовательских (компонентных) интерфейсов, линейных (агрегатных) интерфейсов, устройств: кроссовой коммутации, защитных переключений, синхронизации, управления и электропитания. На рисунках обязательно фиксируются: точки подключения, виды и количество потоков информационной нагрузки согласно ТЗ. Перед выполнением схем конфигурации каждого узла необходимо составить таблицу аналогичную табл.9.1, но с указанием транспондеров/мультиплексионов по всем направлениям и мультиплексоров пользовательских потоков (SDH/Ethernet/ PDH), агрегирующих потоки в STM-N, 10GE, 100GE и т.д. Также указать рабочие

волны DWDM каждого канала. Пример в табл. 9.5 для одного узла А. Аналогично для других узлов.

Если в составе аппаратуры используются две и большее число корзин (полок, поддонов, подстативов), то обязательно начертить электрические и оптические соединительные линии между блоками этих корзин. Обычно дополнительные корзины (полки расширения) используются для компонентных (пользовательских) интерфейсов в оборудовании SDH, Ethernet, OTN-OTN.

Таблица 9.5. Оборудование по направлениям в узле А

№	Направление	Нагрузка	Мультиплексоры	Тип TPD/MxPD	Ко-во	OSNR, дБ	Сетка, ГГц	Волна, нм
1	А-Б	2 STM-64	SDH/1670SM, 1641SM	TD-10E	1 (на 2 OTU2)	9	50	$\lambda_1=1528,7$ $\lambda_2=1529,1$
		100GE	-	TS-100E	1 (OTU4)	11	50	$\lambda_3=$
2	А-В	2 STM-64	SDH/1670SM, 1641SM	TD-10E	1 (на 2 OTU2)	9	50	$\lambda_4=$ $\lambda_5=$
3	А-Г	STM-64	SDH/1670SM, 1641SM	TD-10E	1 (OTU2)	9	50	$\lambda_6=$
		100GE	-	TS-100E	1 (OTU4)	11	50	$\lambda_7=$
4	А-Д	STM-16	SDH/1670SM, 1641SM	MS-DC10F XP	1 (до 8 вх. STM16, GE, OTU1)	9	50	$\lambda_8=$
		10GE	-	TD-10E	1 (на 2 OTU2)	9	50	$\lambda_9=$

Пример конфигурации мультиплексоров для узла А приведён на рис.9.8, где представлены два вида мультиплексоров транспортной платформы Alcatel OPTINEX: 1670SM (основное оборудование) и 1641SX (полки расширения для пользовательских интерфейсов) и полка оптического оборудования ВОЛГА Т8. Конфигурации мультиплексоров представлены в упрощенном виде, т.е. без панелей коммутации интерфейсных окончаний и автоматических коммутаторов защиты компонентных плат (карт, блоков). При этом обязательно указаны связи между мультиплексорами, компонентные (пользовательские) платы с обозначением направления и количества цифровых потоков, агрегатные интерфейсы (STM-64), коммутационные матрицы (MATRIX), контроллеры управления (EQUICO) и т.д. (см. техническую документацию). На рис. 9.8 для наглядности показана полка расширения только для одного отдельного направления (А-Б), однако ёмкости универсальных полок используются частично и на них можно разместить агрегирование цифровых потоков других направлений (в примере это А-В, А-Г, А-Д). При соответствующем группировании компонентных плат и соединительных интерфейсов возможно использование меньшего числа полок расширения. При составлении схемы конфигурации необходимо оптимизировать комплектацию и добиться наименьшего количества и разнообразия полок (поддонов, корзин, кассет). Также в конфигурации мультиплексора может быть показана плата служебной

связи (пример на рис.9.8, CM-2G-3F) для организации канала управления на отдельной волне.

9.2.11. Разработка схемы организации связи

На схеме организации связи должны быть указаны:

- все пункты проектируемой транспортной сети связи;
- все используемые мультиплексоры, включая дополнительные корзины (полки расширения);
- на всех обозначениях мультиплексоров требуемые по ТЗ информационные пользовательские (компонентные) потоки по направлениям (А-Б, А-В, и т.д.) и соответствующие им интерфейсы;
- агрегатные (линейные) интерфейсы, с подключаемыми к ним оптическими линиями (рабочими и резервными);
- типы оптических кабелей и их длины между узлами связи;
- промежуточные станции оптического усиления или регенерации с названиями населенных пунктов и указанием расстояний;
- промежуточные пункты с выделением отдельных волокон из кабельной линии.

Рисунок схемы организации связи должен быть достаточного размера для прочтения всех надписей, т.е. размер знаков при компьютерном наборе не менее 10 →(10). На схеме должны отчётливо просматриваться все проектируемые связи согласно ТЗ. Рекомендуются использовать единую сквозную нумерацию организуемых связей. Пример схемы организации связи приведен на рис. 9.9. Этот пример не является точным отражением выше приведённых примеров, однако из схемы должно быть понятно, что используются два вида оптических транспортных платформ: платформа SDH от NATEX (FG-FOM10GM) и платформа OTN/OTH от Т8 (ВОЛГА). Платформа мультиплексора SDH позволяет формировать агрегированные потоки уровня STM-1/4/16/64 с их последующей загрузкой в структуры OTU2/3 платформы OTH. Отдельными мукспондерами решается задача формирования оптических каналов на скорости 100/400 Гбит/с. Все оптические каналы в этом примере транспортной сети поддерживают соединение типа «точка-точка» и каждое соединение организуется на своей назначенной волне. Защита всех соединений в любой из оптических секций мультиплексирования может быть реализована благодаря использованию матрицы оптического коммутатора WSS-ROADM.

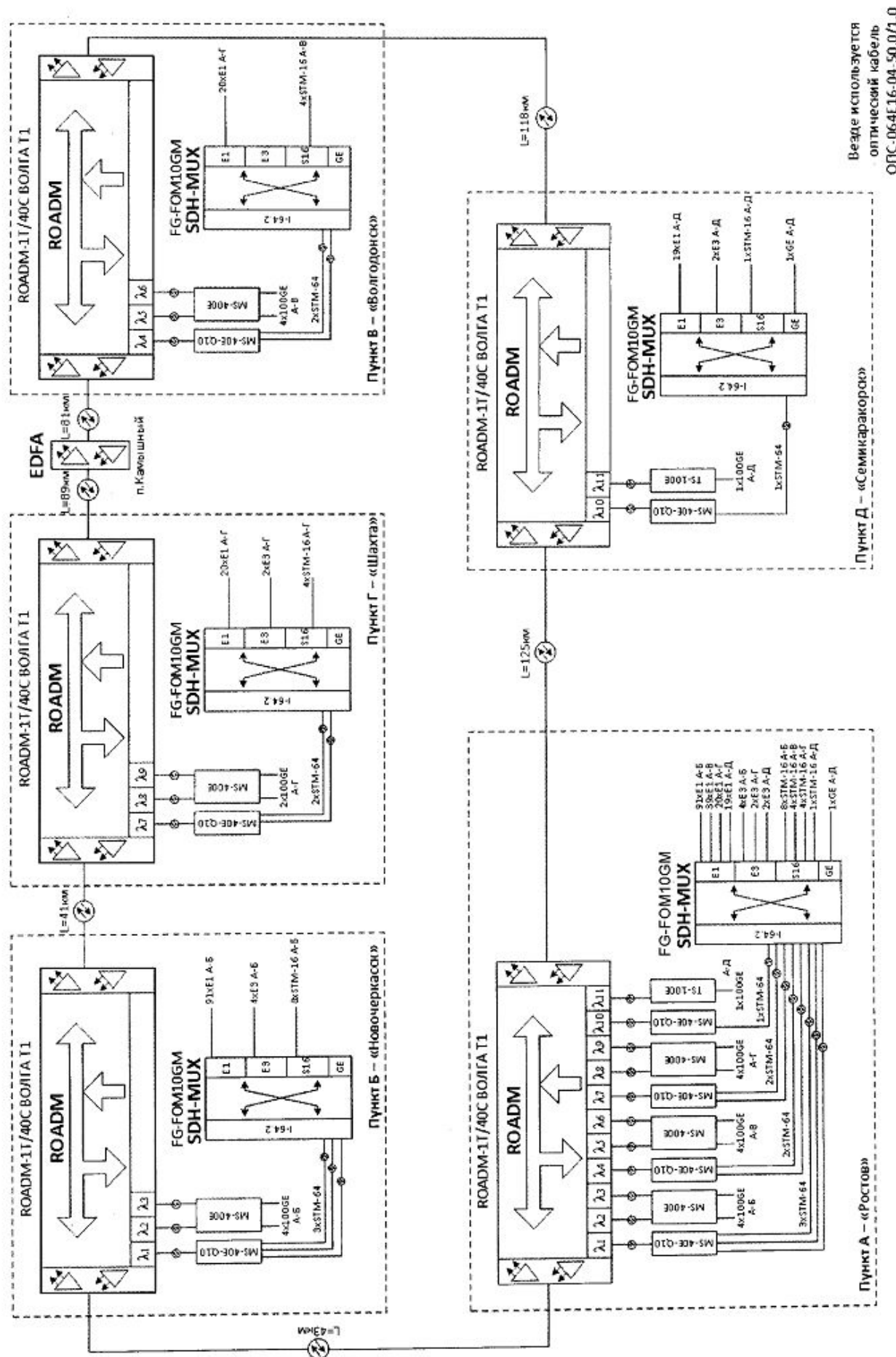


Рис. 9.9. Пример схемы организации связи

9.2.12. Разработка схемы синхронизации транспортной сети

Перед разработкой схемы синхронизации оптической транспортной сети необходимо внимательно изучить указания раздела 5 учебного пособия, литературу [14, 22, 23, 43, 49, 51-54], технические характеристики выбранной аппаратуры и ТЗ в п.4.

Составить таблицу приоритетов использования входов синхросигналов в каждом мультиплексоре, где имеется встроенный тактовый генератор, требующий принудительной синхронизации. Такие генераторы размещаются в оборудовании SDH, OTN-OTN, Ethernet, ATM. В синхронизации не нуждается оптическое оборудование (оптические мультиплексоры, оптические усилители и т.д.). Соединения оптических каналов типа «точка-точка» по технологии OTN также не нуждаются в специальной синхронизации. Однако, при использовании электронной коммутации блоков ODUk сетевая синхронизация необходима. Пример распределения приоритетов приведен в табл.9.6.

Таблица 9.6. Пример таблицы распределения приоритетов

Источники и входы синхросигналов	Приоритеты					
	1	2	3	4	5	6
ПЭГ, вход ТЗ ₁	+					
ВЗГ, вход ТЗ ₂		+				
Компонент, вход Т2					+	
STM-16 запад, вход Т1			+			
STM-16 восток, вход Т1				+		
ГСЭ, вход Т0						+

На схеме синхронизации должны быть указаны:

- все источники (генераторы) тактовых частот (ПЭГ, ВЗГ, ГСЭ), системы распределения синхросигналов (АРСС) и источники компонентных сигналов, используемых в качестве синхронизирующих (от АТС, АМТС, другой транспортной сети);
- все внешние входы синхросигналов в блоки синхронизации мультиплексоров и приоритеты их использования (согласно таблице приоритетов);
- показатели качества (транслируются в байте S1 MSON SDH, также в КИ0 потока E1, отдельными служебными кадрами Ethernet, служебным байтом в заголовке OTUk для OTN) перед входами синхросигналов в блоки синхронизации мультиплексоров;
- направления синхронизации промежуточных регенераторов;
- направления распространения синхросигнала в нормальном режиме работы ТСС;
- направления распространения синхросигналов в аварийном состоянии (восстановление синхронизации по отдельному заданию);

- точки разрыва возможных петель самосинхронизации.

Пример схемы сети синхронизации приведен на рис.9.10. На схеме основной путь синхросигнала показан сплошной линией, а резервный путь прочерчен пунктиром. Принудительная синхронизация выполняется от узла АРСС ВЗГ, расположенного в пункте А. Резервным источником синхронизации в этом примере является ГСЭ А (приоритет Р2).

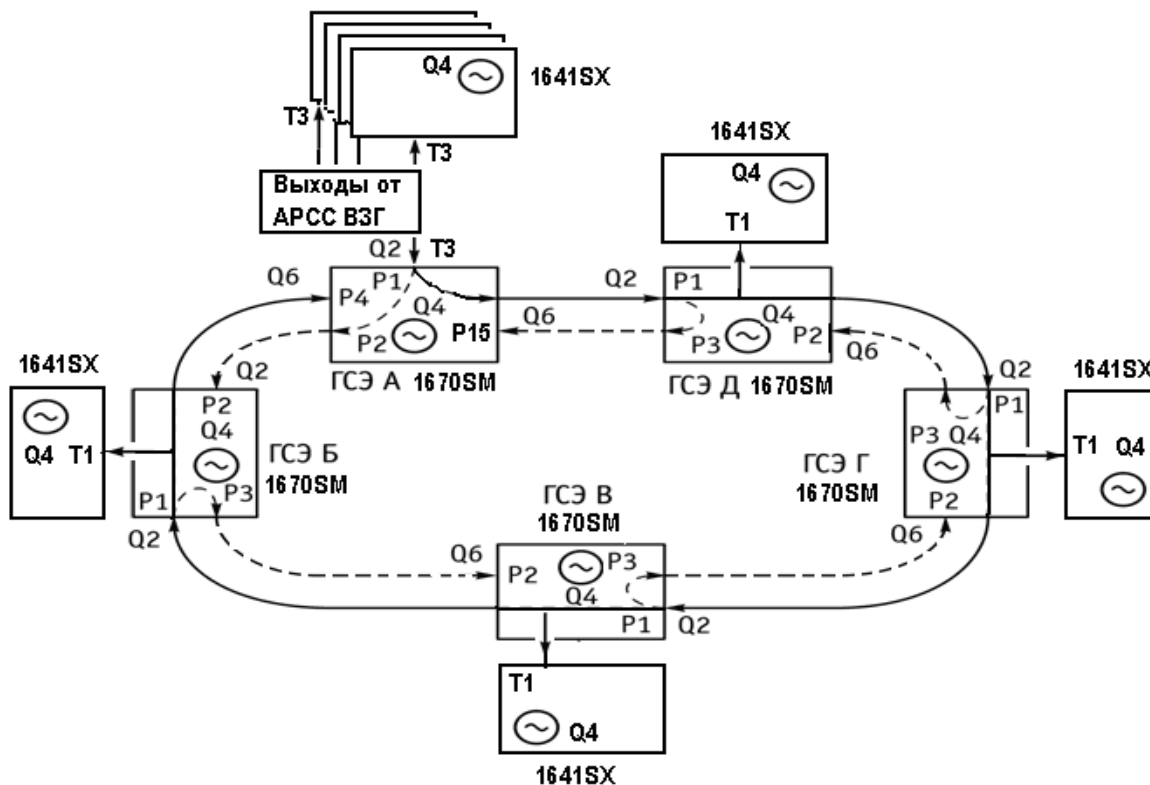


Рис. 9.10. Пример схемы сети синхронизации с оборудованием SDH

При необходимости (по ТЗ) выбрать оборудование сети синхронизации от ведущих производителей, например, «Symmetricom» или «Oscilloquartz» (www.symmetricom.com , www.oscilloquartz.com) и др. Это может быть оборудование ПЭГ, ВЗГ, АРСС, GPS или ГЛОНАСС.

При разработке транспортной сети с пакетной передачей (Ethernet, TR-MPLS) необходимо в проекте синхронизации руководствоваться техническими данными оборудования и принципами синхронизации пакетной передачи, подробно представленными в рекомендациях МСЭ-Т серии G.82xx.

9.2.13. Разработка схемы управления транспортной сетью

Перед разработкой схемы управления необходимо внимательно изучить принципы управления в телекоммуникациях, используя литературу [1, 14, 78].

Необходимо изучить всю информацию производителя оборудования транспортной сети с точки зрения построения системы управления для оборудования и транспортных сетей в целом. Обратить внимание на

возможности локального и сетевого управления, типы операционных систем управления (управления сетевыми элементами, управления сетью, управления услугами транспортной сети, управления синхронизацией). Выбрать систему управления, подходящую под проектируемую сеть.

На схеме управления транспортной сетью должны быть указаны:

- все управляемые сетевые элементы (мультиплексоры оптические и электрические, регенераторы, оптические усилители, оборудование синхронизации, электропитания и т.д.);
- каналы передачи данных для сети управления с указанием скорости передачи по всем участкам (например, в сети SDH это DCCr 192 кбит/с или OSC в оптической сети на волне 1510 нм при скорости 10/100 Мбит/с);
- интерфейсы локального и сетевого управления (F, Qx,);
- локальная(-ые) сеть(-и) системы управления с серверами и рабочими станциями;
- протоколы взаимодействия в сети (SNMP, CMIP, CORBA и т.д.).

В тексте пояснительной записки должна приводиться краткая характеристика выбранной системы управления. Пример схемы управления проектируемой сети приведен на рис. 9.11.

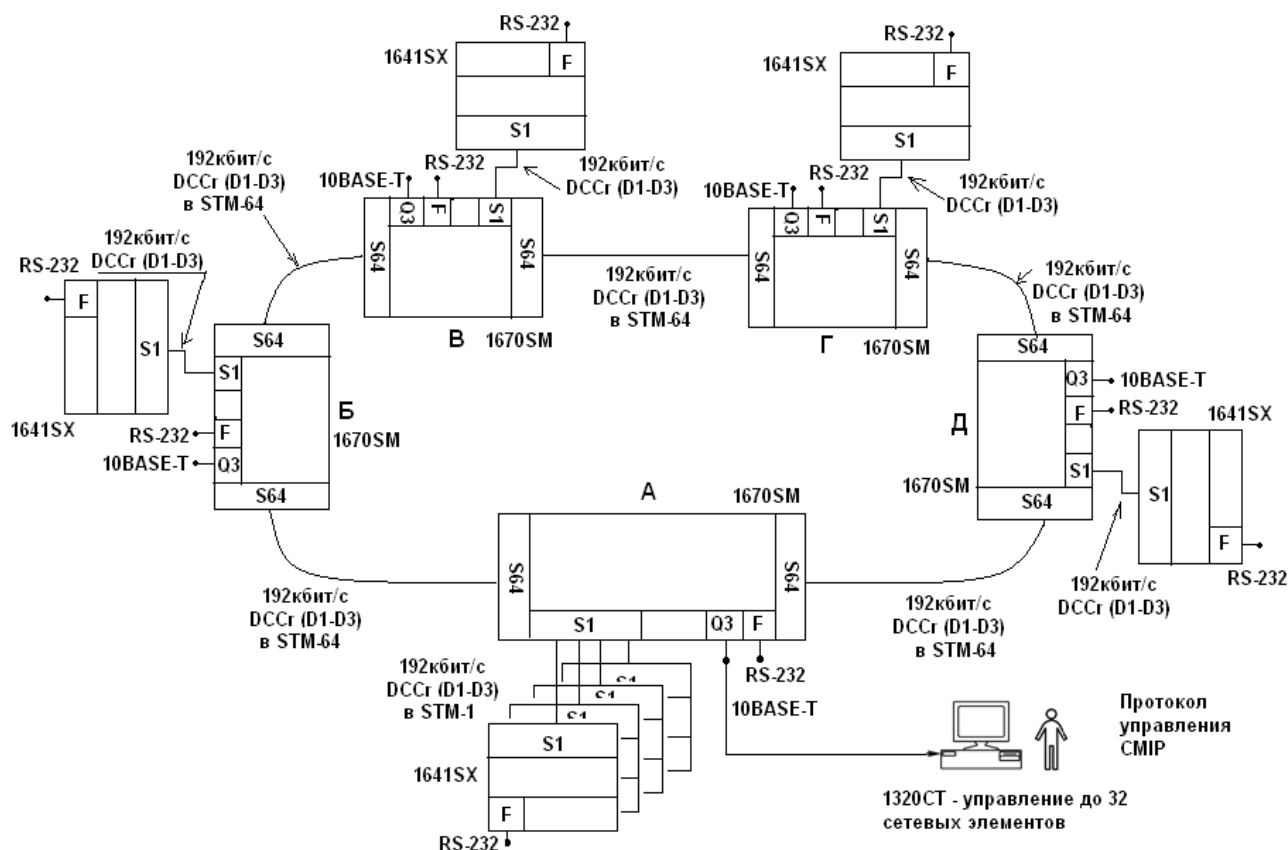


Рис. 9.11. Пример схемы организации управления проектируемой оптической транспортной сети на основе технологии SDH

9.2.14. Выбор необходимых контрольно-измерительных приборов

Для нормального запуска и эксплуатации транспортной сети необходимо предусмотреть контрольно-измерительные приборы:

- для контроля и измерений на волоконно-оптическом кабеле;
- для тестовых испытаний оптического оборудования DWDM и CWDM;
- для тестирования электрических и оптических интерфейсов;
- для тестирования оборудования пакетной передачи (Ethernet, ATM, MPLS);
- для тестирования сигналов и оборудования синхронизации.

Выбор необходимо произвести по данным (каталогам, сайтам в ИНТЕРНЕТ: www.pr-group.ru, www.syrus.ru и др.) производителей, например, EXFO (www.EXFO.com), JDSU (www.jdsu.com , www.acterna.ru), Anritsu (www.anritsu.com).

В тексте пояснительной записки должны приводиться краткие характеристики выбранных приборов.

9.2.15. Расчет потребления электроэнергии оборудованием транспортной сети и выбор источника электропитания

Для выбора источника электропитания оборудования оптической транспортной сети необходимо произвести расчет потребляемой совокупной мощности в каждом узле при условии максимальной комплектации полок (корзин). По совокупной мощности вычисляется величина электрического тока и выбирается подходящий источник тока с заданным (по техническим характеристикам аппаратуры) напряжением. При этом нужно учесть, что качество работы источника электропитания, в частности пульсации тока, зависит от потребляемого тока. Чем больше величина тока, тем больше величина пульсаций. Пульсации могут вызвать сбой синхронизации цифровой передачи, что повлечет увеличение коэффициента ошибок. Рекомендуется выбирать источник тока с двукратным запасом от максимального потребляемого тока оборудованием транспортной сети. Например, можно использовать источники типа УЭПС-3к (www.promsd.ru), который подключается к однофазной (220 В) и трехфазной (380 В) сети переменного тока. Необходимо определить площадь сечения провода токоведущей жилы и выбрать тип провода, который должен соединить источник тока с питаемой аппаратурой. Величина падения напряжения на токоведущем проводе не должна превышать 1 В. При известном токе потребления определяется допустимое электрическое сопротивление провода

$$R_0 = U_{\text{доп}} / I,$$

где $U_{\text{доп}} \leq 1 \text{ В}$, I – величина электрического тока (А), потребляемого аппаратурой.

Сопротивление R_0 зависит от длины провода (l , м), удельного сопротивления (ρ , Ом \times мм²/м), площади сечения (S , мм²) и от температуры окружающей среды (как правило, если провода находятся на открытой атмосфере):

$$R_0 = \rho \times l / S.$$

Приведенное соотношение позволяет определить площадь сечение провода S . Для определения типа провода необходимо обратиться к электротехническим справочникам или на сайт www.ruscable.ru. Длина провода обусловлена местом расположения источника тока и аппаратуры связи и может составлять от 2-3м до 100-150м.

Результаты расчетов и выбора источников электропитания необходимо отразить в тексте пояснительной записки.

9.2.16. Комплектация оборудования

Составить таблицу подробной комплектации оборудования (транспондеры, мукспондеры, мультиплексоры, усилители, корзины, стойки, пассивные электрические и оптические кроссы и т.д.) в каждом узле транспортной сети, включая промежуточные станции оптического усиления, оптической регенерации, регенерации электрических сигналов, оборудования электропитания.

9.2.17. Схема прохождения цепей в ЛАЦ

На схеме прохождения цепей в линейном аппаратном цехе (ЛАЦ) должны отображаться все электрические и оптические цепи:

- линейный(-е) оптический(-е) кабель(-и) и все волокна, выводимые на оптический кросс;
- стационарные оптические кабели с волокнами, стыкуемыми с линейными волокнами в оптическом кроссе с одной стороны и с аппаратурой с другой стороны;
- оптические соединительные шнуры между блоками оптической аппаратуры, расположенными на различных стойках в пределах цеха;
- электрические цепи компонентных сигналов (витые пары для E1, Ethernet 10, 100, 1000 Мбит/с), коаксиальные кабели для E3, E4, STM-1 и сигналов синхронизации, провода (шины) электропитания и заземления.

Все цепи должны изображаться в привязке к аппаратуре (мультиплексорам, устройствам внешней синхронизации (ПЭГ, ВЗГ, АРСС), устройствам управления сетью и электропитания) и т.д.

Пример схемы прохождения цепей в ЛАЦ приведен на рис. 9.12.

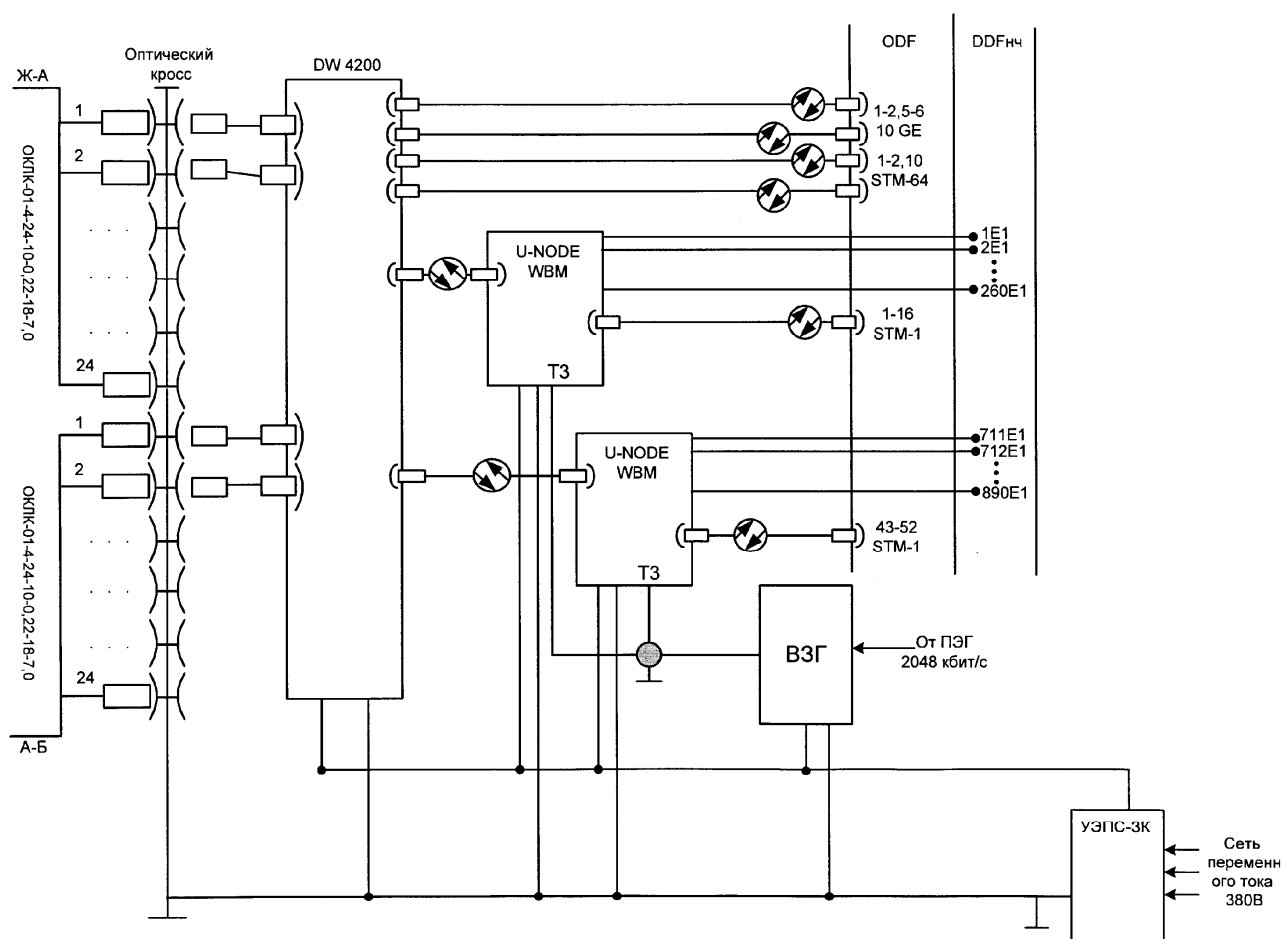


Рис. 9.12. Пример схемы прохождения электрических и оптических цепей в ЛАЦ

На схеме прохождения цепей в ЛАЦ желательно обозначить волоконные световоды, предназначенные для аренды, местных сетей и т.д. согласно п.3 технического задания.

9.2.18. Оформление курсового проекта

Курсовой проект в части пояснительной записки, рисунков, таблиц, графиков, содержания, списка литературы должен выполняться в полном соответствии с требованиями, изложенными в учебном пособии **«Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронных средств: учеб. пособие / В.Я. Вайспайр, Г.П. Катунин, Г.Д. Мефодьева; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : 2005. - 249с. - 150, р.»**, которое находится в библиотеке СибГУТИ.

Ниже представлен пример для оформления технических характеристик оборудования в приложении к курсовому проекту.

9.2.19. Пример оформления для приложения. Комплектующие. Оптический мультиплексор - мукспондер MS-100E-T10

Общее назначение

Агрегирующий мультиплексор (мукспондер) MS-100E объединяет 10 клиентских сигналов 10 Гбит/с и передает их в одном 100G DWDM-канале. Изменять тип клиентского протокола можно в любом из 10 каналов без остановки линейного трафика. Мукспондер выполняет 3R-регенерацию, преобразует данные в формат OTN OTU4 и использует мощные алгоритмы коррекции ошибок. Передача данных осуществляется на стабилизированной длине волны в соответствии с частотной сеткой DWDM. Блок имеет Ethernet-порт для организации служебного канала ESC внутри служебных заголовков OTN OTU4 на рабочей длине волны мукспондера. На приемной стороне производится когерентное детектирование сигнала. Конструктивное оформление представлено на рис.П1.



Рис.П1. Конструктивное оформление блока мукспондера

На передней панели расположены 10 дуплексных оптических гнёзд для подключения оптическими шнурами клиентского оборудования. Справа расположены оптические гнёзда для подключения оптического спаренного шнура (LINE) к ROADM. К гнезду CONTROL предусмотрено подключение оборудования служебной связи, управления и мониторинга оптического канала.

Возможности MS-100E-T10:

- передача 10 клиентских сигналов 10GE, STM-64, OTU2, 8/10 GFC
- служебный канал ESC в линейном интерфейсе
- коррекция ошибок SoftFEC 15%
- когерентный формат модуляции DP-QPSK
- перестраиваемый в C-диапазоне лазер
- организация до 96 каналов с шагом 50 ГГц
- автоматическая коррекция дисперсии до 70 000 пс/нм
- допустимое значение $OSNR_{\tau} = 12,5$ дБ (0,1 нм, BER = 10^{-12})

Структурная схема MS-100E-T10 представлена на рис. П.2. Для портов подключения оборудования клиентов предусмотрены модули SFP+ на скорости 10 Гбит/с. Линейный выход OTU4 подключается к оптическому мультиплексору/демультиплексору (ROADM) волн DWDM. В таблице П1. представлены интерфейсные оптические характеристики для двух вариантов исполнения с различными уровнями передачи, чувствительностью приёмника и эффективностью исправления ошибок FEC.

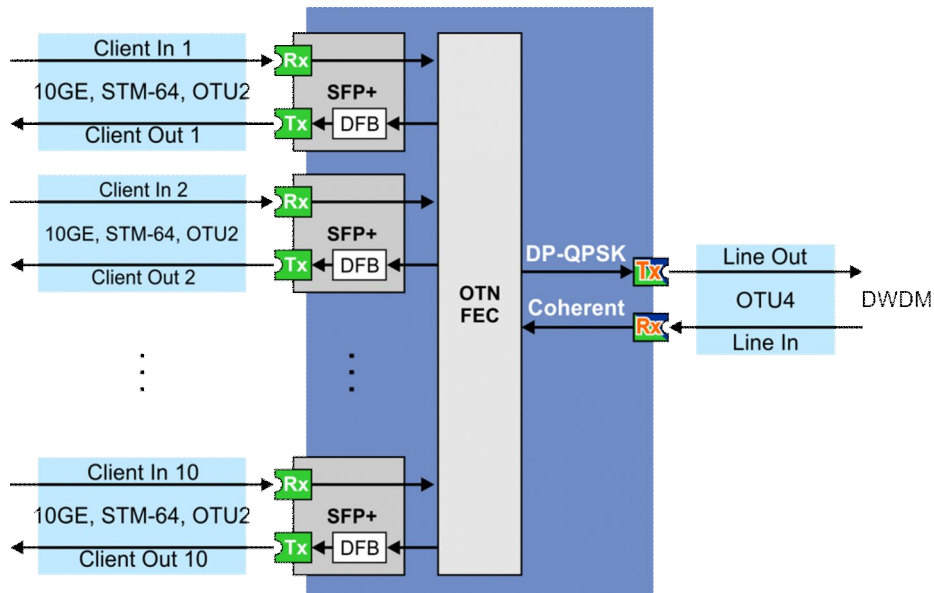


Рис.П2. Структура мукспондера MS-100E-T10

Таблица П1. Оптические характеристики

Параметр	MS-100E-T10	MS-100E-T10-SH
Линейный интерфейс, скорость передачи в линии / нагрузка	OTU4, 120 / 10*10 Гбит/с	
Стандарты клиентских интерфейсов	10GE, STM-64, OTU2, 8/10 GFC	
Выходной уровень мощности	-5 ... 0 дБм	-15 ... 1 дБм
Диапазон рабочих длин волн передатчика	1528,7–1567,1 нм	
Чувствительность приемника (BER=10 ⁻¹²)	-18 дБм	-21 дБм
Перегрузка приемника (BER=10 ⁻¹²)	0 дБм	
Автоматическая коррекция дисперсии	до 70000 пс/нм	до 22000 пс/нм
OSNR _T (0,1 нм, BER=10 ⁻¹²)	12,5 дБ (с Soft-FEC 15%)	14,5 дБ(с Soft-FEC 15%) 19,1 дБ (ITU-T G.709 FEC 7%)
Потребляемая мощность не более	165 Вт	125 Вт

Заключение

Подводя итоги учебного проектирования оптической мультисервисной транспортной сети необходимо подчеркнуть перспективные ключевые составляющие процесса.

1. Технологии транспортных сетей продолжают развиваться. реализованы стандарты: на скоростной режим передачи 100 Гбит/с для Ethernet; на скоростной режим передачи 120 Гбит/с для OTN-OTN (OTU-4). Внедряются оптические интерфейсы на скорости 200-400 Гбит/с, что обусловлено технологиями квадратурной фазовой манипуляции с двойной поляризацией сигнала квадратурной амплитудной на 16 и более состояний (DP-QPSK, Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-16QAM, - 64QAM, и т.д.), которые позволяют поддерживать высокоскоростные режимы на протяженных участках волоконно-оптических систем передачи. Внедрена активная компенсация дисперсионных искажений в протяженных оптических линиях и упреждающая коррекция ошибок (FEC). Все шире используются распределённые рамановские усилители и регенераторы 2R, 3R. Происходит распространение оптических коммутаторов и интегрированных реконфигурируемых оптических мультиплексоров CDC-ROADM и т.д. Перспективным является реализация скоростных режимов до 1Пбит/с с использованием многосердцевинных и маломодовых (MCF и FMF) волокон.
2. Технологии оптических сетей вплотную приблизились к пользовательским терминалам, прежде всего, благодаря технологиям FTTx. При этом в распоряжение пользователя поступает сетевое окончание на скорости от 100 Мбит/с до 1000 Мбит/с.
3. Все больше возрастает роль пакетной передачи и коммутации (Ethernet PBB/PBT, MPLS/TP-MPLS, IPv6) в обеспечении пользователей высококачественными услугами (рис.3.1) и возможным переходом к двухуровневой модели (рис.3.2) с программным конфигурированием транспорта SDN-T.
4. Всё шире используются системы передачи мультиплексирования с разделением по длине волны (CWDM и DWDM с фиксированной и гибкими сетками волн) на различных участках транспортных сетей: от магистрального до доступа.

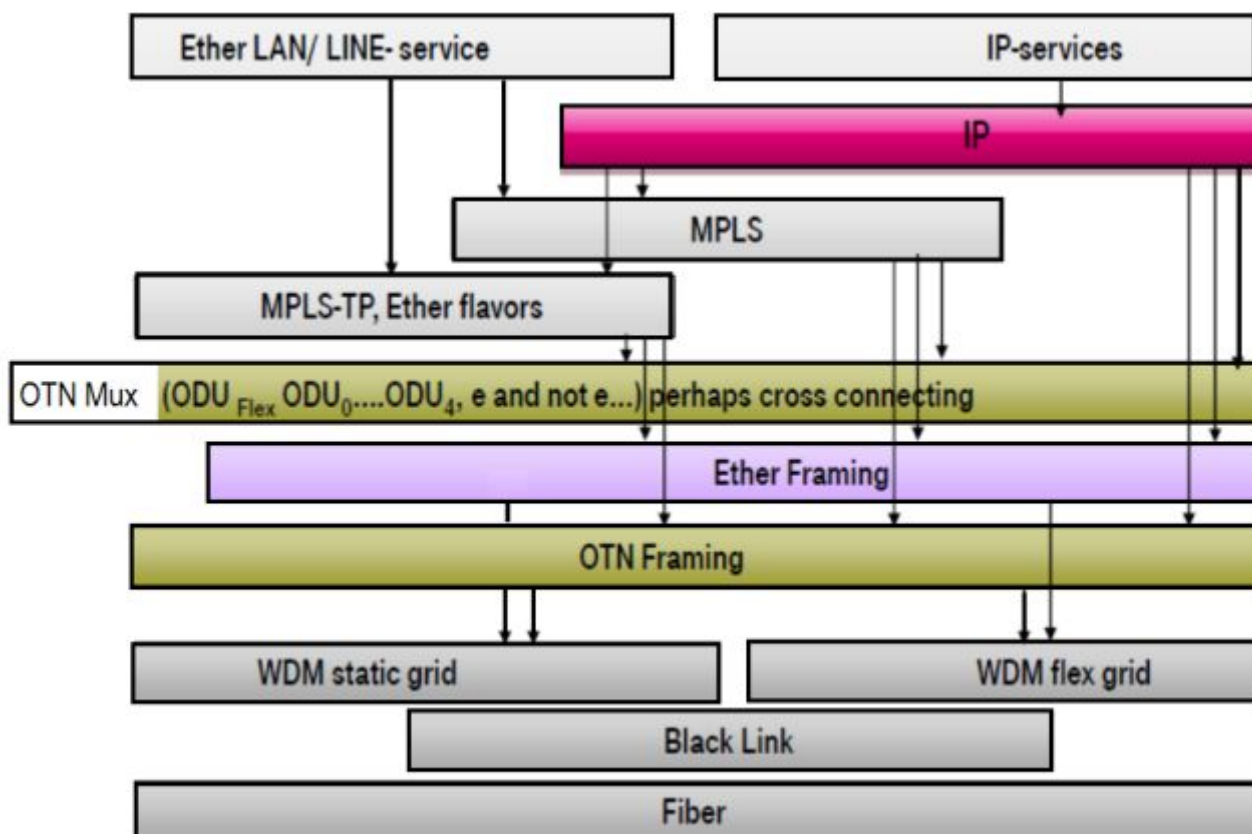


Рисунок 3.1. Реальная перспектива развития оптических сетей

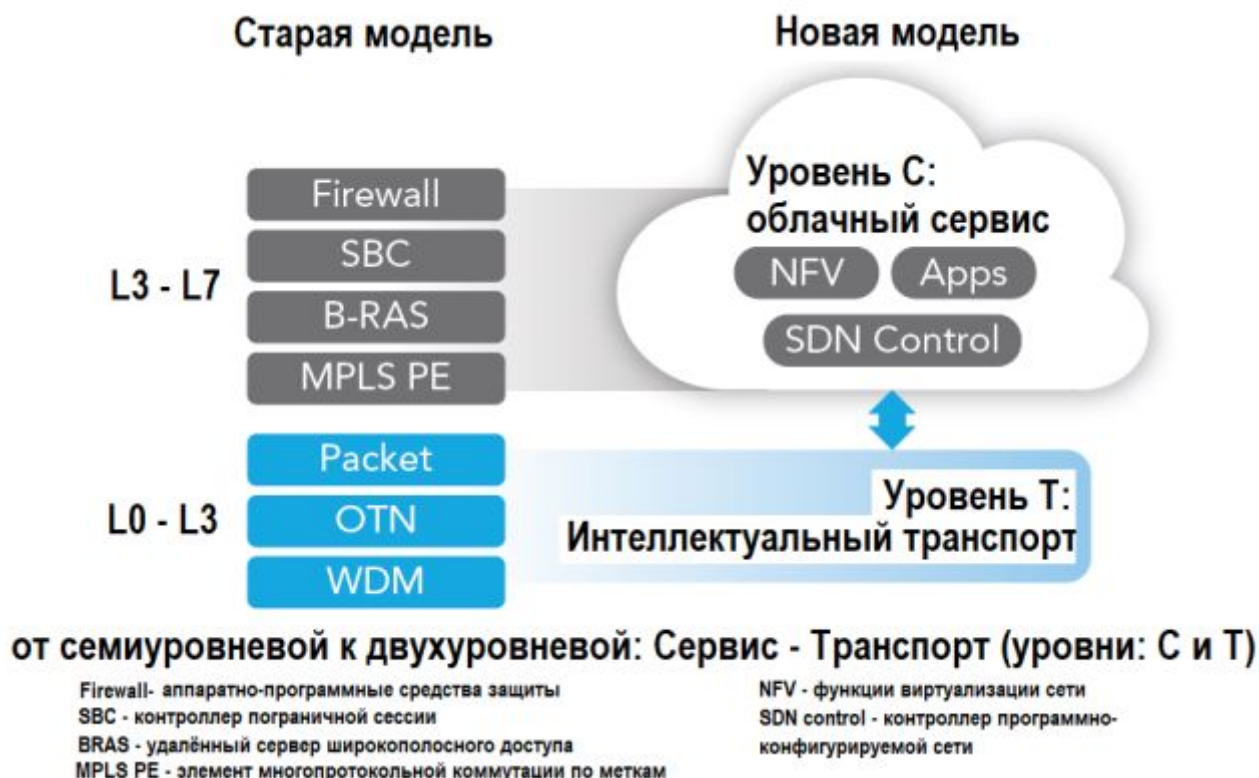


Рисунок 3.2. Трансформация сетевой модели

Приложение 1. Характеристики оптических интерфейсов SDH

Таблица П1.1. Характеристики STM-1

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-1, 155 520, скремблированный NRZ			
Прикладной код		I-1	S-1.1	S-1.2	
Рабочий диапазон волн	нм	1260-1360	1261-1360	1430-1576	1430-1580
Передатчик в опорной точке S					
Тип источника		FP	LED	FP	DFB
Спектральные характеристики:					
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	40	80	7,7	2,5
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	-	-	-	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	-	-	30
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	-8	-8	-8	-8
– минимальная	дБм	-15	-15	-15	-15
Миним. коэффициент гашения (EX)	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12	
Максим. дисперсия	пс/нм	18	25	96	296
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-23	-28	-28	-28
Минимальная перегрузка	дБм	-8	-8	-8	-8
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О

Сокращения: СКЗ, средняя квадратическая зависимость; Н/О, не определено; NRZ, non return to zero – без возвращения к нулю; FP, Fabry-Perot – Фабри-Перо (конструкция полупроводникового лазера); LED, light-emitting diode – светодиод; DFB, distributed feedback – распределённая обратная связь. Коэффициент гашения (EX) определяют как: $EX = 10 \log (A/B)$, где А – средний уровень оптической мощности в центре логической "1", а В – средний уровень оптической мощности в центре логического "0". Общеприняты следующие условия для уровней оптической логики:

- излучение света – логическая единица "1";
- отсутствие излучения – логический нуль "0".

Таблица П1.2. Характеристики STM-1

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-1, 155 520, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-1.1	L-1.2	L-1.3	
Рабочий диапазон волн	нм	1263-1360	1480-1580	1534-1566/ 1523-1577	1480-1580
Передатчик в опорной точке S		FP	DFB	DFB	
Тип источника					
Спектральные характеристики:					
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	3	-	-	-
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	-	1	1	-
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	30
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	0	0	0	0
– минимальная	дБм	-5	-5	-5	-5
Миним. коэффициент гашения (EX)	дБ	10	10	10	10
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	10-28	10-28	10-28	
Максим. дисперсия	пс/нм	246	H/O	246/296	H/O
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	H/O	20	H/O	
Максимальная дискретная отража- тельная способность между S и R	дБ	H/O	-25	H/O	
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-34	-34	-34	
Минимальная перегрузка	дБм	-10	-10	-10	
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	H/O	-25	H/O	

Сокращения: СКЗ, средняя квадратическая зависимость; H/O, не определено; NRZ, non return to zero – без возвращения к нулю; FP, Fabry-Perot – Фабри-Перо (конструкция полупроводникового лазера); LED, light-emitting diode – светодиод; DFB, distributed feedback – распределённая обратная связь

Таблица П1.3. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение		
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080, скремблированный NRZ		
Прикладной код		I-4	S-4.1	S-4.2
Рабочий диапазон волн	нм	1261-1360	1293-1334/ 1274-1356	1430-1580
Передатчик в опорной точке S				
Тип источника		FP LED	FP	DFB
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	14,5 35	4/2,5	-
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	-	-	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	-	30
Средняя вводимая мощность:				
– максимальная	дБм	-8	-8	-8
– минимальная	дБм	-15	-15	-15
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между S и R				
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12
Максим. дисперсия	пс/нм	13 14	46/74	H/O
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	H/O	H/O	24
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	H/O	H/O	-27
Приемник в опорной точке R				
Минимальная чувствительность	дБм	-23	-28	-28
Минимальная перегрузка	дБм	-8	-8	-8
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	H/O	H/O	-27

Таблица П1.4. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-4.1		L-4.2	L-4.3
Рабочий диапазон волн	нм	1300- 1325/ 1296-1330	1280- 1335	1480- 1580	1480-1580
Передатчик в опорной точке S		FP	DFB	DFB	DFB
Тип источника					
Спектральные характеристики:					
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	2,0/1,7	-	-	-
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	-	1	<1	1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	30
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+2		+2	+2
– минимальная	дБм	-3		-3	-3
Миним. коэффициент гашения	дБ	10		10	10
Оптический тракт между S и R					
Диапазон ослабления	дБ	10-24		10-24	10-24
Максим. дисперсия	пс/нм	92/109	H/O	1600	H/O
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	20		24	20
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	-25		-25	-25
Приемник в опорной точке R					
Минимальная чувствительность	дБм	-28		-28	-28
Минимальная перегрузка	дБм	-8		-8	-8
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1		1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	-14		-27	-14

Таблица П1.5. Характеристики STM-4

Характеристики	Единица	Значение				
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-4, 622 080, скремблированный NRZ				
Прикладной код		V-4.1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3
Рабочий диапазон волн	нм	1290- 1330	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565	1530- 1565
Передатчик в опорной точке MPI-S						
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:						
– параметр линейной частотной модуляции	Рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:						
– максимальная	дБм	4	4	4	15	15
– минимальная	дБм	0	0	0	12	12
Миним. коэффициент гашения	дБ	10	10	10	10	10
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R						
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	22-33	33-44	33-44
Максимальная дисперсия	пс/нм	200	2400	400	3200	530
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	480	480	480	480	480
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	24	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R						
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-34	-34	-34	-34	-33
Минимальная перегрузка	дБм	-18	-18	-18	-18	-18
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27

Сокращения: ОМЛ, одномодовый лазер; Н/О - не определено (смотреть характеристики от производителя); ДГВЗ, дифференциальное групповое время задержки. В интерфейсах U-4.2 и U-4.3 может применяться оптический предусилитель.

Таблица П1.6. Характеристики STM-16

Характеристики	Единица	Значение				
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-16, 2 488 320, скремблированный NRZ				
Прикладной код		I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2/ L-16.3
Рабочий диапазон волн	нм					
Передатчик в опорной точке S						
Тип источника		FP	DFB	DFB	DFB	DFB
Спектральные характеристики:						
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	4	-	-	-	-
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	-	1	<1	1	<1
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	-	30	30	30	30
Средняя вводимая мощность:						
– максимальная	дБм	-3	0	0	+3	+3
– минимальная	дБм	-10	-5	-2	-2	-2
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между S и R						
Диапазон ослабления	дБ	0-7	0-12	0-12	12-24	12-24
Максимальная дисперсия на верхнем пределе длины волны	пс/нм	12	H/O	800	H/O	1600/ 450
Максимальная дисперсия на нижнем пределе длины волны	пс/нм	12	H/O	420	H/O	1200/ 450
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в S, включая любые соединители	дБ	24	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между S и R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке R						
Минимальная чувствительность	дБм	-18	-18	-18	-27	-28/-27
Минимальная перегрузка	дБм	-3	0	0	-9	-9
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1	1	2/1
Максимальная отражательная способность, измеренная в R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27

Таблица П1.7. Характеристики STM-16

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-16, 2 488 320, скремблированный NRZ			
Прикладной код		V-16.2	V-16.3	U-16.2/ P1U1-1A2	U-16.3/ P1U1-1A3
Рабочий диапазон волн	нм	1530- 1565	1530- 1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S					
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:					
– параметр линейной частотной модуляции	рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	30	30
– максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+13	+13	+15	+15
– минимальная	дБм	+10	+10	+12	+12
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R					
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	33-44	33-44
Максимальная дисперсия	пс/нм	2400	400	3200	530
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	120	120	120	120
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R					
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-25	-24	-34	-33
Минимальная перегрузка	дБм	-9	-9	-18	-18
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноволновых (одноканальных) оптических интерфейсов (STM-16, 64 и 256) определены в рекомендации G.959.1.

Таблица П1.8. Характеристики STM-64

Характеристики	Единица	Значение			
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-64, 9 953 280, скремблированный NRZ			
Прикладной код		L-64.2a	L-64.2b	L-64.2c	L-64.3
Рабочий диапазон волн	нм	1530-1565	1530-1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S					
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:					
– параметр линейной частотной модуляции	рад	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	30	30
– максимальная спектральная плотность мощности	мВт/10МГц	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:					
– максимальная	дБм	+2	+13	+2	+13
– минимальная	дБм	-2	+10	-2	+10
Миним. коэффициент гашения	дБ	10	8,2	10	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R					
Диапазон ослабления	дБ	11-22	16-22	11-22	16-22
Максимальная дисперсия	пс/нм	1600	1600	1600	260
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	30	30
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R					
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-26	-14	-26	-13
Минимальная перегрузка	дБм	-9	-3	-9	-3
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	2	2	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноканальных оптических интерфейсов I-64.1r, I-64.1, I-64.2r, I-64.2, I-64.3, I-64.5, S-64.1, S-64.2a, S-64.2b, S-64.3a, S-64.3b, S-64.5a, S-64.5b определены в рекомендации G.959.1.

Таблица П1.9. Характеристики STM-64

Характеристики	Единица	Значение		
Цифровой сигнал, скорость передачи, линейное кодирование	кбит/с	STM-64, 9 953 280, скремблированный NRZ		
Прикладной код		V-64.2a	V-64.2b	V-64.3
Рабочий диапазон волн	нм	1530-1565	1530-1565	1530-1565
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Спектральные характеристики:				
– параметр линейной частотной модуляции	рад	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	Н/О	Н/О	30
- максимальная спектральная плотность мощности	мВт/ 10МГц	Н/О	Н/О	Н/О
Средняя вводимая мощность:				
– максимальная	дБм	+13	+15	+13
– минимальная	дБм	+10	+12	+10
Миним. коэффициент гашения	дБ	10	8,2	8,2
Оптический тракт между MPI-S и MPI-R				
Диапазон ослабления	дБ	22-33	22-33	22-33
Максимальная дисперсия	пс/нм	2400	2400	400
Минимальная дисперсия	пс/нм	Н/О	Н/О	Н/О
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	30
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Приемник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-25	-23	-24
Минимальная перегрузка	дБм	-9	-7	-9
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	2	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27

Примечание: характеристики ряда одноканальных оптических интерфейсов STM-64 (I-64.1r, I-64.1, I-64.2r, I-64.2, I-64.3, I-64.5, S-64.1, S-64.2a, S-64.2b, S-64.3a, S-64.3b, S-64.5a, S-64.5b) и STM-256 определены в рекомендации G.959.1.

Приложение 2. Характеристики оптических интерфейсов стандарта G.693
Таблица П2.1.

Код приложения	Единицы	VSR600-2R1	VSR600-2M1	VSR600-2M3 VSR600-2M4 VSR600-2M5
Код G.691		I-64.1r		
Код G.959.1		P111-2D1r		
Расстояние	м	600	600	600
Скорость битов/линейное кодирование оптических сигналов		10Гбит/с /NRZ	10Гбит/с /NRZ	10Гбит/с /NRZ
Тип оптического волокна		G.652	G.652	G.652/ G.653/ G.655
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника		ММЛ	ММЛ	ОМЛ
Рабочий диапазон волн	нм	1268-1360	1268-1360	1530-1565
Максимальная средняя выходная мощность	дБм	-1	+5	+2
Минимальная средняя выходная мощность	дБм	-6	+2	-1
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	3	3	H/O
– максимальная ширина на уровне -20 дБ	нм	H/O	H/O	H/O
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	H/O	H/O	30
Минимальный коэффициент гашения (EX)	дБ	6	6	8.2
Основной оптический тракт от MPI-S до MPI-R				
Максимальное затухание	дБ	4	12	12
Минимальное затухание	дБ	0	6	3
Максимальная хроматическая дисперсия	пс/нм	3,4	3,4	12/ 2/ 6
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	30
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	14	14	14
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Потери, зависящие от поляризации	дБ	H/O	H/O	H/O
Приёмник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-11	-11	-11
Минимальная перегрузка	дБм	-1	-1	-1
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-14	-14	-14

Таблица П2.2

Код приложения	Единицы	VSR2000-2R1	VSR2000-3R1	VSR2000-3R1F
Код G.691		I-64.1		
Код G.959.1		P1П1-2D1		
Расстояние	км	2	2	2
Скорость битов/линейное кодирование оптических сигналов		10Гбит/с / NRZ	40Гбит/с / NRZ	OTU3 с FEC 43Гбит/с NRZ
Тип оптического волокна		G.652	G.652	G.652
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Рабочий диапазон волн	нм	1290-1330	1290-1330	1290-1330
Максимальная средняя выходная мощность	дБм	-1	+3	+3
Минимальная средняя выходная мощность	дБм	-6	0	0
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	1	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	30	35	35
Минимальный коэффициент гашения (EX)	дБ	6	8,2	8.2
Основной оптический тракт от MPI-S до MPI-R				
Максимальное затухание	дБ	4	4	4
Минимальное затухание	дБ	0	0	0
Максимальная хроматическая дисперсия	пс/нм	6,6	6,6	6,6
Максимальная ДГВЗ	пс	30	7,5	7,5
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	14	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Потери, зависящие от поляризации	дБ	Н/О	Н/О	Н/О
Приёмник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-11	-5	-5
Минимальная перегрузка	дБм	-1	+3	+3
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	1	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-14	-27	-27

Таблица П2.3.

Код приложения	Единицы	VSR2000-2L1F	VSR2000-2L2/3/5	VSR2000-3L1F
Код G.691			I-64.2r	
Код G.959.1			P111-2D2r	
Расстояние	км	2	2	2
Скорость битов/линейное кодирование оптических сигналов		OTU2 с FEC 10,7Гбит/с NRZ	10Гбит/с NRZ	OTU3 с FEC 43Гбит/с NRZ
Тип оптического волокна		G.652	G.652, G.653, G.655	G.652
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника	нм	ОМЛ 1290-1330	ОМЛ 1530-1565	ОМЛ 1290-1330
Рабочий диапазон волн	нм			
Максимальная средняя выходная мощность	дБм	-1	-1	+3
Минимальная средняя выходная мощность	дБм	-6	-5	0
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	1	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	30	30	35
Минимальный коэффициент гашения (EX)	дБ	6	8,2	8.2
Основной оптический тракт от MPI-S до MPI-R				
Максимальное затухание	дБ	6	6	6
Минимальное затухание	дБ	0	0	0
Максимальная хроматическая дисперсия	пс/нм	6,6	40	6,6
Максимальная ДГВЗ	пс	30	30	7,5
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	14	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Потери, зависящие от поляризации	дБ	Н/О	Н/О	Н/О
Приёмник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-13	-13	-7
Минимальная перегрузка	дБм	-1	-1	+3
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	2	1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-14	-27	-27

Таблица П2.4.

Код приложения	Единицы	VSR2000-3M1	VSR2000-3M2/3/5	VSR2000-3H2/3/5
Код G.691				
Код G.959.1				
Расстояние	км	2	2	2
Скорость битов/линейное кодирование оптических сигналов		40Гбит/с NRZ	40Гбит/с NRZ	40Гбит/с NRZ
Тип оптического волокна		G.652	G.652/ G.653/ G.655	G.652/ G.653/ G.655
Передатчик в опорной точке MPI-S				
Тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
Рабочий диапазон волн	нм	1290-1330	1530-1565	1530-1565
Максимальная средняя выходная мощность	дБм	+10	+3	+3
Минимальная средняя выходная мощность	дБм	+8	0	0
Спектральные характеристики:				
– максимальное СКЗ ширины ($\Delta\lambda$)	нм	Н/О	Н/О	Н/О
– максимальная ширина на уровне –20 дБ	нм	Н/О	Н/О	Н/О
– минимальный коэффициент подавления боковой моды	дБ	35	35	35
Минимальный коэффициент гашения (EX)	дБ	8,2	7	7
Основной оптический тракт от MPI-S до MPI-R				
Максимальное затухание	дБ	12	12	16
Минимальное затухание	дБ	8	3	3
Максимальная хроматическая дисперсия	пс/нм	6,6	40/ 6,6/ 20	40/ 6,6/ 20
Максимальная ДГВЗ	пс	7,5	7,5	7,5
Минимальные оптические возвратные потери на кабельном участке в MPI-S, включая любые соединители	дБ	24	24	24
Максимальная дискретная отражательная способность между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27
Потери, зависящие от поляризации	дБ	Н/О	Н/О	Н/О
Приёмник в опорной точке MPI-R				
Минимальная чувствительность (коэффициент ошибок 10^{-12})	дБм	-5	-14/ -13/-13	-18/ -17/ -17
Минимальная перегрузка	дБм	+2	0	0
Максимальный штраф оптического тракта	дБ	1	2/ 1/ 1	2/ 1/ 1
Максимальная отражательная способность, измеренная в MPI-R	дБ	-27	-27	-27

Приложение 3. Характеристики оптических интерфейсов G.695 CWDM
Таблица П3.1.Характеристики 4-х канальных интерфейсов короткой линии

Характеристики	Единицы	Типы интерфейсов		
		C4S1-1D2	C4S1-1D3	C4S1-1D5
Общая информация: -максимальное число каналов -битовая скорость/линейное кодирование -максимальная битовая ошибка -тип волокна	- - -	4 2,5Гбит/с, NRZ 10^{-12} G.652 G.653 G.655		
Интерфейс в точке MPI-S_M: -максимальный уровень мощности на выходе канала -минимальный уровень мощности на выходе канала -максимальный общий уровень мощности на выходе -центральная волна -интервал между каналами -максимальная девиация центральной волны -минимальный коэффициент гашения	дБм дБм дБм нм нм нм дБ	 +4,5 -3,0 +10,5 1511+20m m=0...3 20 ±6,5 8,2		
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_M до точки MPI-R_M: -максимальное затухание -минимальное затухание -диапазоны хроматической дисперсии -1511нм -1531нм -1551нм -1571нм -минимальные оптические возвратные потери MPI-S _M -максимальное дискретное отражение между MPI-S _M и MPI-R _M -максимальная дифференциальная групповая задержка	дБ дБ пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм дБ дБ пс	 10,5 4 0...+719 -250...+39 0...+323 0...+775 -169...+83 0...+371 0...+833 -124...+128 0...+420 0...+890 -79...+177 0...+470 24 -27 120		
Интерфейс в точке MPI-R_M: -максимальный уровень мощности на входе канала -минимальный уровень мощности на входе канала -максимальный общий уровень мощности на входе -максимальный штраф оптического тракта -минимальная эквивалентная чувствительность -максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБм дБм дБм дБ дБм дБ	 +0,5 -13,5 +6,5 1,5 -15 -27		

Таблица ПЗ.2. Характеристики 4-х канальных интерфейсов длинной линии

Характеристики	Единицы	Типы интерфейсов		
		C4L1-1D2	C4L1-1D3	C4L1-1D5
Общая информация: -максимальное число каналов -битовая скорость/линейное кодирование -максимальная битовая ошибка -тип волокна	- - -	4 2,5Гбит/с, NRZ 10^{-12} G.652 G.653 G.655		
Интерфейс в точке MPI-S_М: -максимальный уровень мощности на выходе канала -минимальный уровень мощности на выходе канала -максимальный общий уровень мощности на выходе -центральная волна -интервал между каналами -максимальная девиация центральной волны -минимальный коэффициент гашения	дБм дБм дБм нм нм нм дБ	+4,5 -3,0 +10,5 $1511+20m \text{ } m=0...3$ 20 $\pm 6,5$ 8,2		
Оптический тракт от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М (один интервал): -максимальное затухание -минимальное затухание -диапазоны хроматической дисперсии -1511нм -1531нм -1551нм -1571нм -минимальные оптические возвратные потери MPI-S _М -максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М -максимальная дифференциальная групповая задержка	дБ дБ пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм дБ дБ пс	19,5 20,5 0...+1332 0...+1437 0...+1544 0...+1650	20,5 13 -490...+7739 -331...+164 -242...+251 -155...+347	20 0...+618 0...+711 0...+805 0...+900
Интерфейс в точке MPI-R_М: -максимальный уровень мощности на входе канала -минимальный уровень мощности на входе канала -максимальный общий уровень мощности на входе -максимальный штраф оптического тракта -минимальная эквивалентная чувствительность -максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБм дБм дБм дБ дБм дБ	-8,5 -22,5 -23,5 23 -2,5 2,5 1,5 2 -25 -27		

Таблица ПЗ.3. Характеристики двунаправленных 4-х канальных интерфейсов длинной линии

Характеристики	Единицы	Типы интерфейсов			
		BC4L1-0D2	BC4L1-0D3	BC4L1-1D2	BC4L1-1D3
Общая информация: -максимальное число каналов -битовая скорость/линейное кодирование -максимальная битовая ошибка -тип волокна	- - -	2+2 1,25Гбит/с, NRZ 10 ⁻¹² G.652	G.653	2+2 2,5Гбит/с, NRZ 10 ⁻¹² G.652	G.653
Интерфейс в точке MPI-S_М: -максимальный уровень мощности на выходе канала -минимальный уровень мощности на выходе канала -максимальный общий уровень мощности на выходе -центральная волна -интервал между каналами -максимальная девиация центральной волны -минимальный коэффициент гашения	дБм дБм дБм нм нм нм дБ	+5 0 +8 1511+20m m=0...3 20 ±6,5 8,2		+5 0 +8 1511+20m m=0..3 20 ±6,5 8,2	
Оптический тракт от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М: -максимальное затухание -минимальное затухание -диапазоны хроматической дисперсии -1511нм -1531нм -1551нм -1571нм -минимальные оптические возвратные потери MPI-S _М -максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М -максимальная дифференциальная групповая задержка	дБ дБ пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм дБ дБ пс	25,5 12 0..1735 -610..95 0..1872 -412...204 0...2012 -302..312 0..2150 -193...432 24 -27 120		22,5 23,5 12 0..1533 -560..88 0..1654 -378..187 0..1778 -277..396 0..1900 -177..396 24 -27 120	
Интерфейс в точке MPI-R_М: на входе -максимальный уровень мощности -минимальный уровень мощности -максимальный общий уровень -максимальный штраф оптического тракта -минимальная эквивалентная чувствительность -максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБм дБм дБм дБ дБм дБ	-7 -25,5 -4 1,5 -27 -27		-7 -22,5 -23,5 -4 2,5 1,5 -25 -27	

Таблица ПЗ.4. Характеристики 8-ми канальных интерфейсов

Характеристики	Единицы	Типы интерфейсов		
		C8S1-1D2	B-C8S1-1D3	C8L1-1D2
Общая информация: -максимальное число каналов -битовая скорость/линейное кодирование -максимальная битовая ошибка -тип волокна	- - -	8 2,5Гбит/с, NRZ 10 ⁻¹² G.652	4+4	8
Интерфейс в точке MPI-S_М: -максимальный уровень мощности на выходе канала -минимальный уровень мощности на выходе канала -максимальный общий уровень мощности на выходе -центральная волна -интервал между каналами -максимальная девиация центральной волны -минимальный коэффициент гашения	дБм дБм дБм нм нм нм дБ	+4, -3,5 +13 1511+20m m=0...7 ±6,5 8,2	+10	+13
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М: -максимальное затухание -минимальное затухание -диапазоны хроматической дисперсии -1471нм -1491нм -1511нм -1531нм -1551нм -1571нм -1591нм -1611нм -минимальные оптические возвратные потери MPI-S _М -максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М -максимальная дифференциальная групповая задержка	дБ дБ пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм дБ дБ пс	9 3 0...481 0...526 0...571 0...616 0...662 0...708 0...754 0...800 24 -27 120	9 3 0...481 0...526 0...571 0...616 0...662 0...708 0...754 0...800	18 12 0...962 0...1051 0...1143 0...1233 0...1325 0...1416 0...1507 0...1600
Интерфейс в точке MPI-R_М: на входе канала -максимальный уровень мощности -минимальный уровень мощности -максимальный общий уровень -максимальный штраф оптического тракта -минимальная эквивалентная чувствительность -максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБм дБм дБм дБ дБм дБ	+1 -12,5 +10 1,5 -14 -27	+1 -12,5 +7 1,5 -14	-8 -21,5 +1 2,5 -24

Таблица ПЗ.5. Характеристики двунаправленных 8-ми канальных интерфейсов

Характеристики	Ед.	Типы интерфейсов	
		B-C8L1-0D2	B-C8L1-1D2
Общая информация: -максимальное число каналов -битовая скорость/линейное кодирование -максимальная битовая ошибка -тип волокна	- - -	4+4 1,25Гбит/с, NRZ 10 ⁻¹² G.652	2,5Гбит/с, NRZ
Интерфейс в точке MPI-S_M: -максимальный уровень мощности на выходе канала -минимальный уровень мощности на выходе канала -максимальный общий уровень мощности на выходе -центральная волна -интервал между каналами -максимальная девиация центральной волны -минимальный коэффициент гашения	дБм дБм дБм нм нм нм дБ	+4, -3,5 +10 1471+20m m=0...7 20 ±6,5 8,2	
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_M до точки MPI-R_M: -максимальное затухание -минимальное затухание -диапазоны хроматической дисперсии -1471нм -1491нм -1511нм -1531нм -1551нм -1571нм -1591нм -1611нм -минимальные оптические возвратные потери MPI-S _M -максимальное дискретное отражение между MPI-S _M и MPI-R _M -максимальная дифференциальная групповая задержка	дБ дБ пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм пс/нм дБ дБ пс	21 3 0...1118 0...1222 0...1328 0...1433 0...1540 0...1646 0...1752 0...1860 24 -27 120	18 12 0...962 0...1051 0...1143 0...1233 0...1325 0...1416 0...1507 0...1600
Интерфейс в точке MPI-R_M: на входе канала -максимальный уровень мощности -минимальный уровень мощности -максимальный общий уровень -максимальный штраф оптического тракта -минимальная эквивалентная чувствительность -максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБм дБм дБм дБ дБм дБ	-8 -24,5 -2 1,5 -26 -27	-21,5

Таблица ПЗ.6. Характеристики двунаправленного 12-ти канального интерфейса

Характеристики	Ед.	В-C12L1-1D2	
Волновой диапазон	нм	1291-1351нм	1471-1611нм
Общая информация:			
-максимальное число каналов	-	6+6	
-битовая скорость/линейное кодирование	-	2,5Гбит/с, NRZ	
-максимальная битовая ошибка	-	10^{-12}	
-тип волокна	-	G.652	
Интерфейс в точке MPI-S_М:			
-максимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+3,5	+1,5
-минимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	-4	-6
-максимальный общий уровень мощности на выходе	дБм	+10,7	
-центральная волна	нм	1291+20m m=0..3	1471+20m m=0..7
-интервал между каналами	нм	20	
-максимальная девиация центральной волны	нм	±6,5	
-минимальный коэффициент гашения	дБ	8,2	
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М:			
-максимальное затухание	дБ	18	12,8
-минимальное затухание	дБ	11	7
-диапазоны хроматической дисперсии			
-1291нм	пс/нм	-188...0	
1311нм	пс/нм	-91...+78	
1331нм	пс/нм	0...+163	
1471нм	пс/нм	0...+245	
-1471нм	пс/нм		0...+619
-1491нм	пс/нм		0...+677
-1511нм	пс/нм		0...+736
-1531нм	пс/нм		0...+794
-1551нм	пс/нм		0...+853
-1571нм	пс/нм		0...+911
-1591нм	пс/нм		0...+970
-1611нм	пс/нм		0...+1030
-миним. оптич. возвр. потери в MPI-S _М	дБ	24	
-максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М	дБ	-27	
-максим. диффер. групповая задержка	пс	120	
Интерфейс в точке MPI-R_М:			
на входе канала			
-максимальный уровень мощности	дБм	-7,5	-5,5
-минимальный уровень мощности	дБм	-22	-18,8
-максимальный общий уровень	дБм	+2,3	
-максимальный штраф оптич. тракта	дБ	1	2
-минимальная эквивал. чувствительность	дБм	-23	-20,8
-максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБ	-27	

Таблица ПЗ.7. Характеристики 16-ти канального интерфейса

Характеристики	Ед.	C12S1-1D2		
Волновой диапазон	нм	1311-1371	1391-1451	1471-1611
Общая информация:				
-максимальное число каналов	-	16		
-битовая скорость/линейное кодирование	-	2,5Гбит/с, NRZ		
-максимальная битовая ошибка	-	10^{-12}		
-тип волокна	-	G.652C или G.652D		
Интерфейс в точке MPI-S_М:				
-максим. уровень мощн. на выходе канала	дБм	+3,5	+2,5	+1,5
-миним. уровень мощн. на выходе канала	дБм	-4	-5	-6
-максим. общий уровень мощн. на выходе	дБм	+14,2		
-центральная волна	нм	1311+20m (m=0...3)	1391+20m (m=0...3)	1471+20m (m=0...7)
-интервал между каналами	нм	20		
-максим. девиация центральной волны	нм	±6,5		
-минимальный коэффициент гашения	дБ	8,2		
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М:				
-максимальное затухание	дБ	8,5	7,5	6,5
-минимальное затухание	дБ	3,5	2,5	1
-диапазоны хроматической дисперсии				
-1311нм	пс/нм	-45...39		
-1331нм	пс/нм	0...81		
-1351нм	пс/нм	0...121		
-1371нм	пс/нм	0...160		
-1391нм	пс/нм		0...193	
-1411нм	пс/нм		0...221	
-1431нм	пс/нм		0...249	
-1451нм	пс/нм		0...278	
-1471нм	пс/нм			0...307
-1491нм	пс/нм			0...335
-1511нм	пс/нм			0...364
-1531нм	пс/нм			0...393
-1551нм	пс/нм			0...422
-1571нм	пс/нм			0...451
-1591нм	пс/нм			0...480
-1611нм	пс/нм			0...510
-миним. оптич. возврат. потери MPI-S _М	дБ	24		
-максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М	дБ	-27		
-максим. дифференц. групповая задержка	пс	120		
Интерфейс в точке MPI-R_М:				
на входе канала				
-максимальный уровень мощности	дБм	0	0	+0,5
-минимальный уровень мощности	дБм	-12,5	-12,5	-13
-максимальный общий уровень	дБм	+12,3		
-максим. штраф оптического тракта	дБ	1	1	1,5
-миним. эквивалентная чувствительность	дБм	-13,5	-13,5	-14
-максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБ	-27		

Таблица ПЗ.8. Характеристики 16-ти канального интерфейса

Характеристики	Ед.	C12L1-1D2		
Волновой диапазон	нм	1311-1371	1391-1451	1471-1611
Общая информация:				
-максимальное число каналов	-	16		
-битовая скорость/линейное кодирование	-	2,5Гбит/с, NRZ		
-максимальная битовая ошибка	-	10^{-12}		
-тип волокна	-	G.652C или G.652D		
Интерфейс в точке MPI-S_М:				
-максим. уровень мощн. на выходе канала	дБм	+3,5	+1,5	-0,5
-миним. уровень мощн. на выходе канала	дБм	-4	-6	-8
-максим. общий уровень мощн. на выходе	дБм	+13,4		
-центральная волна	нм	1311+20m (m=0...3)	1391+20m (m=0...3)	1471+20m (m=0...7)
-интервал между каналами	нм	20		
-максим. девиация центральной волны	нм	±6,5		
-минимальный коэффициент гашения	дБ	8,2		
Оптический тракт (один интервал) от точки MPI-S_М до точки MPI-R_М:				
-максимальное затухание	дБ	18	15,8	13,3
-минимальное затухание	дБ	11	9	7
-диапазоны хроматической дисперсии				
-1311нм	пс/нм	-95...82		
-1331нм	пс/нм	0...171		
-1351нм	пс/нм	0...257		
-1371нм	пс/нм	0...339		
-1391нм	пс/нм	0...408		
-1411нм	пс/нм	0...468		
-1431нм	пс/нм	0...528		
-1451нм	пс/нм	0...588		
-1471нм	пс/нм	0...649		
-1491нм	пс/нм	0...710		
-1511нм	пс/нм	0...771		
-1531нм	пс/нм	0...832		
-1551нм	пс/нм	0...894		
-1571нм	пс/нм	0...956		
-1591нм	пс/нм	0...1018		
-1611нм	пс/нм	0...1080		
-миним. оптич. возврат. потери MPI-S _М	дБ	24		
-максимальное дискретное отражение между MPI-S _М и MPI-R _М	дБ	-27		
-максим. дифференц. групповая задержка	пс	120		
Интерфейс в точке MPI-R_М:				
на входе канала				
-максимальный уровень мощности	дБм	-7,5		
-минимальный уровень мощности	дБм	-22	-21,8	-21,3
-максимальный общий уровень	дБм	+4,5		
-максим. штраф оптического тракта	дБ	1	1,5	2
-миним. эквивалентная чувствительность	дБм	-23	-23,3	-23,3
-максимальное отражение оптического сетевого элемента	дБ	-27		

Приложение 4. Характеристики одноканальных оптических интерфейсов G.698.1

Таблица П4.1. NRZ 2,5 Гбит/с (100 ГГц, короткая линия)

Параметры	Ед.	DN100S-ID2(C) DN100S-ID3(L) DN100S-ID5(C)	DW100S-ID2(C) DW100S-ID3(L) DW100S-ID5(C)	DN100S-ID2(C)F DN100S-ID3(L)F DN100S-ID5(C)F	DW100S-ID2(C)F DW100S-ID3(L)F DW100S-ID5(C)F
Общая информация					
Минимальный межканальный интервал	ГГц	100	100	100	100
Битовая скорость/ линейное кодирование	-	2,5 Гбит/с NRZ	2,5 Гбит/с NRZ	OTU1 FEC NRZ	OTU1 FEC NRZ
Максимальный коэффициент ошибок по битам	-	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна	-	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655
Интерфейсная точка S_s					
Максимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+4	+4	+4	+4
Минимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	0	0	0	0
Минимальная центральная частота	ТГц	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L
Максимальная центральная частота	ТГц	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L
Максим. спектральное отклонение	ГГц	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20
Миним. подавление боковой моды	дБ	30	30	30	30
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Маска импульса		G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1
Оптический тракт от S_s до R_s					
Максим. потери, вносимые в канале	дБ	16,5	16,5	19,5	19,5
Миним. потери, вносимые в канал	дБ	4	4	4	4
Максимальный риппл	дБ	2	2	2	2
Максим. хроматическая дисперсия	пс/нм	950	950	1200	1200
Минимальные оптические возвратные потери	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражат. способность между S _s и R _s	дБ	-27	-27	-27	-27
Максим. дифференциальная групповая задержка	пс	120	120	120	120
Максимальные межканальные перекрёстные влияния	дБ	-15	-15	-15	-15
Максим. интерферометрические перекрёстные влияния	дБ	-45	-45	-45	-45
Интерфейсная точка R_s					
Максимальный уровень мощности канала на входе	дБм	0	0	0	0
Минимальный уровень чувствительности	дБм	-18	-18	-21	-21
Максим. штраф оптического тракта	дБ	1,5	1,5	1,5	1,5
Максим. потери отражения на приёме	дБ	-27	-27	-27	-27

Приложение 4. Характеристики одноканальных оптических интерфейсов G.698.1

Таблица П4.2. NRZ 2,5Гбит/с (100ГГц, длинная линия)

Параметры	Ед.	DN100L-ID2(C) DN100L-ID3(L) DN100L-ID5(C)	DW100L-ID2(C) DW100L-ID3(L) DW100L-ID5(C)	DN100L-ID2(C)F DN100L-ID3(L)F DN100L-ID5(C)F	DW100L-ID2(C)F DW100L-ID3(L)F DW100L-ID5(C)F
Общая информация					
Минимальный межканальный интервал	ГГц	100	100	100	100
Битовая скорость/ линейное кодирование	-	2,5 Гбит/с NRZ	2,5 Гбит/с NRZ	OTU1 FEC NRZ	OTU1 FEC NRZ
Максимальный коэффициент ошибок по битам	-	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна	-	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655
Интерфейсная точка S_s					
Максимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+4	+4	+4	+4
Минимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	0	0	0	0
Минимальная центральная частота	ТГц	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L
Максимальная центральная частота	ТГц	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L
Максим. спектральное отклонение	ГГц	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20
Миним. подавление боковой моды	дБ	30	30	30	30
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Маска импульса		G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1
Оптический тракт от S_s до R_s					
Максим. потери, вносимые в канале	дБ	25,5	25,5	28,5	28,5
Миним. потери, вносимые в канал	дБ	13	13	13	13
Максимальный риппл	дБ	2	2	2	2
Максим. хроматическая дисперсия	пс/нм	1400	1400	1600	1600
Минимальные оптические возвратные потери	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражат. способность между S _s и R _s	дБ	-27	-27	-27	-27
Максим. дифференциальная групповая задержка	пс	120	120	120	120
Максимальные межканальные перекрёстные влияния	дБ	-16	-16	-16	-16
Максим. интерферометрические перекрёстные влияния	дБ	-45	-45	-45	-45
Интерфейсная точка R_s					
Максимальный уровень мощности канала на входе	дБм	-9	-9	-9	-9
Минимальный уровень чувствительности	дБм	-28	-28	-31	-31
Максим. штраф оптического тракта	дБ	2,5	2,5	2,5	2,5
Максим. потери отражения на приёме	дБ	-27	-27	-27	-27

Приложение 4. Характеристики одноканальных оптических интерфейсов G.698.1

Таблица П4.3. NRZ 10Гбит/с (100ГГц, короткая линия)

Параметры	Ед.	DN100S-2D2(C) DN100S-2D3(L) DN100S-2D5(C)	DW100S-2D2(C) DW100S-2D3(L) DW100S-2D5(C)	DN100S-2D2(C)F DN100S-2D3(L)F DN100S-2D5(C)F	DW100S-2D2(C)F DW100S-2D3(L)F DW100S-2D5(C)F
Общая информация					
Минимальный межканальный интервал	ГГц	100	100	100	100
Битовая скорость/ линейное кодирование	-	10 Гбит/с NRZ	10 Гбит/с NRZ	OTU2 FEC NRZ	OTU2 FEC NRZ
Максимальный коэффициент ошибок по битам	-	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна	-	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655
Интерфейсная точка S_s					
Максимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+3	+3	+3	+3
Минимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	-1	-1	-1	-1
Минимальная центральная частота	ТГц	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L
Максимальная центральная частота	ТГц	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L
Максим. спектральное отклонение	ГГц	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20
Миним. подавление боковой моды	дБ	30	30	30	30
Миним. коэффициент гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Маска импульса		G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1
Оптический тракт от S_s до R_s					
Максим. потери, вносимые в канале	дБ	18,5	18,5	21,5	21,5
Миним. потери, вносимые в канал	дБ	10	10	10	10
Максимальный риппл	дБ	2	2	2	2
Максим. хроматическая дисперсия	пс/нм	1100	1100	1400	1400
Минимальные оптические возвратные потери	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражат. способность между S _s и R _s	дБ	-27	-27	-27	-27
Максим. дифференциальная групповая задержка	пс	30	30	30	30
Максимальные межканальные перекрёстные влияния	дБ	-16	-16	-16	-16
Максим. интерферометрические перекрёстные влияния	дБ	-45	-45	-45	-45
Интерфейсная точка R_s					
Максимальный уровень мощности канала на входе	дБм	-7	-7	-7	-7
Минимальный уровень чувствительности	дБм	-22	-22	-25	-25
Максим. штраф оптического тракта	дБ	2,5	2,5	2,5	2,5
Максим. потери отражения на приёме	дБ	-27	-27	-27	-27

Приложение 4. Характеристики одноканальных оптических интерфейсов G.698.1

Таблица П4.4. NRZ 10Гбит/с (100ГГц, длинная линия)

Параметры	Ед.	DN100L-2D2(C) DN100L-2D3(L) DN100L-2D5(C)	DW100L-2D2(C) DW100L-2D3(L) DW100L-2D5(C)	DN100L-2D2(C)F DN100L-2D3(L)F DN100L-2D5(C)F	DW100L-2D2(C)F DW100L-2D3(L)F DW100L-2D5(C)F
Общая информация					
Минимальный межканальный интервал	ГГц	100	100	100	100
Битовая скорость/ линейное кодирование	-	10 Гбит/с NRZ	10 Гбит/с NRZ	OTU2 FEC NRZ	OTU2 FEC NRZ
Максимальный коэффициент ошибок по битам	-	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна	-	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655	G.652, G.653, G.655
Интерфейсная точка S_s					
Максимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+6	+6	+6	+6
Минимальный уровень мощности на выходе канала	дБм	+3	+3	+3	+3
Минимальная центральная частота	ТГц	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L	191,5 для С 186,0 для L
Максимальная центральная частота	ТГц	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L	196,2 для С 191,5 для L
Максим. спектральное отклонение	ГГц	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20	±12,5 ±20
Миним. подавление боковой моды	дБ	30	30	30	30
Миним. коэффициент гашения	дБ	9	9	9	9
Маска импульса		G.959.1	G.959.1	G.959.1	G.959.1
Оптический тракт от S_s до R_s					
Максим. потери, вносимые в канале	дБ	24,5	24,5	27,5	27,5
Миним. потери, вносимые в канал	дБ	13	13	13	13
Максимальный риппл	дБ	2	2	2	2
Максим. хроматическая дисперсия	пс/нм	1600	1600	1700	1700
Минимальные оптические возвратные потери	дБ	24	24	24	24
Максимальная дискретная отражат. способность между S _s и R _s	дБ	-27	-27	-27	-27
Максим. дифференциальная групповая задержка	пс	30	30	30	30
Максимальные межканальные перекрёстные влияния	дБ	-16	-16	-16	-16
Максим. интерферометрические перекрёстные влияния	дБ	-45	-45	-45	-45
Интерфейсная точка R_s					
Максимальный уровень мощности канала на входе	дБм	-7	-7	-7	-7
Минимальный уровень чувствительности	дБм	-24	-24	-27	-27
Максим. штраф оптического тракта	дБ	2,5	2,5	2,5	2,5
Максим. потери отражения на приёме	дБ	-27	-27	-27	-27

Приложение 5. Характеристики оптических интерфейсов стандарта G.959.1 для сетей OTN-OTN и SDH

Таблица П5.1. Оптические многоканальные интерфейсы

Характеристики	Ед.	Оптические многоканальные интерфейсы			
		P16S1-1D2 P16S1-1D5	P16I1-2D2 P16I1-2D3 P16I1-2D5	P16S1-2B2 P16S1-2B5	P16S1-2C2 P16S1-2C3 P16S1-2C5
Общая информация					
Максимальное число каналов		16	16	16	16
Скорость/линейный код	Гбит/с	2,5 /NRZ	10/NRZ	10/NRZ	10/NRZ
Максим. коэфф. ошибок		10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}
Тип волокна		G.652, G.655	G.652, G.653,G.655	G.652, G.655	G.652, G.653,G.655
Интерфейс в точке MPI-S_M:					
-максим. уровень мощности на выходе канала	дБм	-4	-3	+3	-7
-миним. уровень мощности на выходе канала	дБм	-10	-6	0	-11
-максим. общий уровень мощности на выходе	дБм	+8	+9	+15	+5
-центральная частота	ТГц	192,1+0,2m m=0...15	192,1+0,2m m=0...15	192,1+0,2m m=0...15	192,1+0,2m m=0...15
-интервал между каналами	ГГц	200	200	200	200
-максим. девиация частоты	ГГц	40	40	40	40
-миним. коэфф. гашения	дБ	8,2	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт (один интервал) от MPI-S_M до MPI-R_M:					
-максимальное затухание	дБ	11	6	11	11
-минимальное затухание	дБ	2	0	0	0
-максим. хроматич. дисп.	пс/нм	800	400	800	800
-минимальные оптические возвратные потери MPI-S _M	дБ	24	24	24	24
-максимальное дискретное отражение между MPI-S _M и MPI-R _M	дБ	-27	-27	-27	-27
-максимальная дифференц. групповая задержка	пс	120	30	30	30
Интерфейс в точке MPI-R_M:					
-максим. уровень мощности на входе канала	дБм	-6	-3	+3	-7
-миним. уровень мощности на входе канала	дБм	-21	-12	-11	-22
-максим. общий уровень мощности на входе	дБм	+6	+9	+15	+5
-максим. штраф оптич тракта	дБ	1	2 и 1	2 и 1	2 и 1
-миним. эквивал. чувств.	дБм	-22	-14 и -13	-13 и -12	-24 и -23
-максим. отражение оптич. сетевого элемента	дБ	-27	-27	-27	-27

Таблица П5.2. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов протяженных линий 2,5Гбит/с с волокном G.652

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы		
		P1L1-1D1	P1L1-1D2	1L1-1D2F
Общая информация Максимальное число каналов Скорость/линейный код Максим. коэфф. ошибок Тип волокна	Гбит/с	1 2,5 /NRZ 10^{-12} G.652	1 2,5/NRZ 10^{-12} G.652	1 OTU1/NRZ FEC 10^{-12} G.652
Интерфейс в точке MPI-S: -диапазон волн -тип источника - ширина спектра на уровне -20дБ -подавление боковых мод -максим. уровень мощности на выходе -миним. уровень мощности на выходе канала -миним. коэффиц. гашения	нм нм дБ дБм дБм дБ	1280-1335 ОМЛ 1 30 +3 -2 8,2	1500-1580 ОМЛ 1 30 +3 -2 8,2	1500-1580 ОМЛ 1 30 +3 -2 8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R: -максимальное затухание -минимальное затухание -максим. хроматич. дисп. -минимальные оптические возвратные потери MPI-S -максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R -максимальная дифференц. групповая задержка	дБ дБ пс/нм дБ дБ пс	22 12 - 24 -27 120	22 12 L-16.2 по G.957 24 -27 120	24 12 L-16.2 по G.957 24 -27 120
Интерфейс в точке MPI-R: -максим. уровень мощности на входе канала -миним. уровень мощности на входе канала -максим. штраф оптич тракта -максим. отражение оптич. сетевого элемента	дБм дБм дБ дБ	-9 -25 1 -27	-9 -26 2 -27	-9 -28 2 -27

Таблица П5.3. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов сверх протяженных линий 2,5Гбит/с

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы		
		P1U1-1A5	1U1-1B2F, 5F	1U1-1B3F
Общая информация Максимальное число каналов Скорость/линейный код Максим. коэфф. ошибок Тип волокна	Гбит/с	1 2,5 /NRZ 10^{-12} G.655	1 OTU1/NRZ FEC 10^{-12} G.652, G.655	1 OTU1/NRZ FEC 10^{-12} G.653
Интерфейс в точке MPI-S: -диапазон волн -тип источника - ширина спектра на уровне -20дБ -подавление боковых мод -максим. уровень мощности на выходе -миним. уровень мощности на выходе канала -миним. коэффиц. гашения	нм нм дБ дБм дБм дБ	1530-1565 ОМЛ - 30 +15 +12 8,2	1530-1565 ОМЛ - 30 +18 +15 8,2	1530-1565 ОМЛ - 30 +18 +15 8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R: -максимальное затухание -минимальное затухание -максим. хроматич. дисп. -минимальные оптические возвратные потери MPI-S -максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R -максимальная дифференц. групповая задержка	дБ дБ пс/нм дБ дБ пс	44 33 1600 24 -27 120	44 27 3200 по G.652 1600 по G.655 24 -27 120	44 27 530 24 -27 120
Интерфейс в точке MPI-R: -максим. уровень мощности на входе канала -миним. Уровень мощности на входе канала -максим. штраф оптич тракта -максим. отражение оптич. Сетевого элемента	дБм дБм дБ дБ	-18 -34 2 -27	-9 -31 2 -27	-9 -30 1 -27

Таблица П5.4. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов коротких линий 10Гбит/с с волокном G.652

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы			
		P1S1-2D1	P1S1-2D2a	P1S1-2D2b	1S1-2D2bF
Код применения по G.691		S-64.1	S-64.2a	S-64.2b	
Общая информация					
Максимальное число каналов	Гбит/с	1	1	1	1
Скорость/линейный код		10 /NRZ	10/NRZ	10/NRZ	OTU2/NRZ
Максим. коэфф. Ошибок		10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	FEC 10^{-12}
Тип волокна		G.652	G.652	G.652	G.652
Интерфейс в точке MPI-S:					
-диапазон волн	нм	1290-1330	1530-1565	1530-1565	1530-1565
-тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
- ширина спектра на уровне - 20дБ	нм	-	-	-	-
-подавление боковых мод	дБ	30	30	30	30
-максим. уровень мощности на выходе	дБм	+5	-1	+2	+2
-миним. Уровень мощности на выходе канала	дБм	+1	-5	-1	-2
-миним. Коэффиц. Гашения	дБ	6	8,2	8,2	8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R:					
-максимальное затухание	дБ	11	11	11	12
-минимальное затухание	дБ	6	7	3	3
-максим. хроматич. дисп.	пс/нм	70	800	800	800
-минимальные оптические возвратные потери MPI-S	дБ	24	24	24	24
-максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
-максимальная дифференц. Групповая задержка	пс	30	30	30	30
Интерфейс в точке MPI-R:					
-максим. уровень мощности на входе канала	дБм	-1	-8	-1	-1
-миним. Уровень мощности на входе канала	дБм	-11	-18	-14	-16
-максим. штраф оптич тракта	дБ	1	2	2	2
-максим. отражение оптич. Сетевого элемента	дБ	-14	-27	-27	-27

Таблица П5.5. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов коротких линий 10Гбит/с с волокнами G.653, G.655

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы		
		P1S1-2D3a, 5a	P1S1-2D3b, 5b	1S1-2D3bF 1S1-2D5bF
Код применения по G.691		S-64.3a S-64.5a	S-64.3b S-64.5b	
Общая информация Максимальное число каналов Скорость/линейный код Максим. коэфф. Ошибок Тип волокна	Гбит/с	1 10 /NRZ 10^{-12} G.653, G.655	1 10/NRZ 10^{-12} G.653, G.655	1 OTU2/NRZ FEC 10^{-12} G.653, G.655
Интерфейс в точке MPI-S: -диапазон волн -тип источника - ширина спектра на уровне -20дБ -подавление боковых мод -максим. уровень мощности на выходе -миним. Уровень мощности на выходе канала -миним. Коэффиц. Гашения	нм нм дБ дБм дБм дБ	1530-1565 ОМЛ - 30 -1 -5 8,2	1530-1565 ОМЛ - 30 +2 -1 8,2	1530-1565 ОМЛ - 30 +2 -2 8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R: -максимальное затухание -минимальное затухание -максим. хроматич. дисп. -минимальные оптические возвратные потери MPI-S -максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R -максимальная дифференц. Групповая задержка	дБ дБ пс/нм дБ дБ пс	11 7 130 24 -27 30	11 3 130 24 -27 30	12 3 130 24 -27 30
Интерфейс в точке MPI-R: -максим. уровень мощности на входе канала -миним. Уровень мощности на входе канала -максим. штраф оптич тракта -максим. отражение оптич. Сетевого элемента	дБм дБм дБ дБ	-8 -17 1 -27	-1 -13 1 -27	-1 -15 1 -27

Таблица П5.6. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов протяженных линий 10Гбит/с с волокном G.652

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы		
		P1L1-2D1	P1L1-2D2	1L1-2D2F
Код применения по G.691		L-64.1		
Общая информация Максимальное число каналов Скорость/линейный код Максим. коэфф. Ошибок Тип волокна	Гбит/с	1 10 /NRZ 10^{-12} G.652	1 10/NRZ 10^{-12} G.652	1 OTU2/NRZ FEC 10^{-12} G.652
Интерфейс в точке MPI-S: -диапазон волн -тип источника - ширина спектра на уровне -20дБ -подавление боковых мод -максим. уровень мощности на выходе -миним. Уровень мощности на выходе канала -миним. Коэффиц. Гашения	нм нм дБ дБм дБм дБ	1290-1320 ОМЛ - 30 +7 +3 6	1530-1565 ОМЛ - 30 +4 0 9	1530-1565 ОМЛ - 30 +4 -1 8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R: -максимальное затухание -минимальное затухание -максим. хроматич. дисп. -минимальные оптические возвратные потери MPI-S -максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R -максимальная дифференц. Групповая задержка	дБ дБ пс/нм дБ дБ пс	22 16 130 24 -27 30	22 11 1600 24 -27 30	22 11 1600 24 -27 30
Интерфейс в точке MPI-R: -максим. уровень мощности на входе канала -миним. Уровень мощности на входе канала -максим. штраф оптич. тракта -максим. отражение оптич. Сетевого элемента	дБм дБм дБ дБ	-9 -20 1 -27	-7 -24 2 -27	-7 -25 2 -27

Таблица П5.7. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов сверх протяженных линий 10Гбит/с

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы			
		P1S1-2D1	P1S1-2D2a	P1S1-2D2b	1S1-2D2bF
Общая информация					
Максимальное число каналов		1	1	1	1
Скорость/линейный код	Гбит/с	10 /NRZ	OTU2/NRZ	10/NRZ	OTU2/NRZ
Максим. коэфф. Ошибок		10^{-12}	FEC 10^{-12}	10^{-12}	FEC 10^{-12}
Тип волокна		G.652	G.652	G.655	G.655
Интерфейс в точке MPI-S:					
-диапазон волн	нм	-	-	1530-1565	1530-1565
- центральная частота	ТГц	192,1	192,1	-	-
-девиация центр. частоты	ГГц	40	40	-	-
-тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
- ширина спектра на уровне -20дБ	нм	-	-	-	-
-подавление боковых мод	дБ	30	30	30	30
-максим. уровень мощности на выходе	дБм	+7	+7	+13	+13
-миним. Уровень мощности на выходе канала	дБм	+4	+3	+10	+10
-миним. Коэффиц. Гашения	дБ	9	9	9	8,2
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R:					
-максимальное затухание	дБ	33	33	33	33
-минимальное затухание	дБ	21	21	20	20
-максим. хроматич. дисп.	пс/нм	2400	2400	800	800
-минимальные оптические возвратные потери MPI-S	дБ	24	24	24	24
-максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
-максимальная дифференц. групповая задержка	пс	30	30	30	30
Интерфейс в точке MPI-R:					
-максим. уровень мощности на входе канала	дБм	-14	-14	-7	-7
-миним. Уровень мощности на входе канала	дБм	-30	-31	-24	-24
-максим. штраф оптич тракта	дБ	1	1	1	1
-максим. отражение оптич. сетевого элемента	дБ	-27	-27	-27	-27

Таблица П5.8. Одноканальные оптические интерфейсы компонентных сигналов 40Гбит/с

Характеристики	Ед.	Одноканальные оптические интерфейсы			
		P1S1-3C2 P1S1-3C3 P1S1-3C5	P1L1-3A2 P1L1-3A3 P1L1-3A5	1L1-3C2FD 1L1-3C3FD 1L1-3C5FD	1L1-3C2F 1L1-3C3F 1L1-3C5F
Общая информация					
Максимальное число каналов	Гбит/с	1	1	1	1
Скорость/линейный код		40 /NRZ	40/NRZ	OTU3/NRZ	OTU3/NRZ
Максим. коэфф. Ошибок		10 ⁻¹²	10 ⁻¹²	FEC 10 ⁻¹²	FEC 10 ⁻¹²
Тип волокна	-	G.652, G.653, G.655			
Интерфейс в точке MPI-S:					
- центральная частота	ТГц	192,1	192,1	192,1	192,1
-девиация центр. частоты	ГГц	40	40	40	40
-тип источника		ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ	ОМЛ
- ширина спектра на уровне - 20дБ	нм	-	-	-	-
-подавление боковых мод	дБ	35	35	35	35
-максим. уровень мощности на выходе	дБм	+3	+8	+5	+5
-миним. Уровень мощности на выходе канала	дБм	-3	+5	+2	+2
-миним. Коэффиц. Гашения	дБ	8,2	10	10	10
Оптический тракт от MPI-S до MPI-R:					
-максимальное затухание	дБ	11	22	22	22
-минимальное затухание	дБ	0	11	11	11
-максим. хроматич. дисп.	пс/нм	800, 140, 400	1600, 280, 800	1600, 280, 800	1600, 280, 800
-минимальные оптические возвратные потери MPI-S	дБ	24	24	24	24
-максимальное дискретное отражение между MPI-S и MPI-R	дБ	-27	-27	-27	-27
-максимальная дифференц. групповая задержка	пс	7,5	7,5	7,5	7,5
Интерфейс в точке MPI-R:					
-максим. уровень мощности на входе канала	дБм	+3	-3	-6	-6
-миним. Уровень мощности на входе канала	дБм	-17	-20	-22	-23
-максим. штраф оптич тракта	дБ	3	3	2	3
-максим. отражение оптич. сетевого элемента	дБ	-27	-27	-27	-27

Примечание: величины хроматической дисперсии приведены в порядке записи стандартов волокон G.652, G.653, G.655.

Приложение 6. Расчёт характеристик оптических каналов

Расчёт характеристик оптических каналов выполняется при проектировании оптической транспортной сети с выбором конкретного оборудования с известными характеристиками, топологии сети, с определёнными расстояниями между узлами сети, требуемой ёмкостью оптических каналов и скоростью передачи информационного трафика. Также в расчёт должны входить параметры волоконных световодов кабельных линий.

Ниже приводятся примеры расчётов для двух топологий транспортных оптических сетей («линейная цепь» и «кольцо» с защитой соединений). Исходные данные формулируются в постановке задачи на проектирование и привлекаются известные характеристики оборудования ROADM/PXC, оптических усилителей и интерфейсов оптических сетей.

Целью выполняемых расчётов является проверка правильности принятых проектных решений по конфигурации оптической сети и оптических каналов, по выбору оборудования и интерфейсов, по выполнению заданных соотношений OSNR в каналах, по дисперсионным искажениям в каналах и т.д.

1. Расчёт характеристик каналов оптической сети типа «линейная цепь»

В постановку задачи проектирования оптической сети входят:

- таблица с заданием числа оптических каналов и скоростью передачи в них информационных потоков, организуемых в сети между узлами, виды информационных потоков (SDH, Ethernet, OTH, TP-MPLS и т.д.);
- расстояние между узлами линейной цепи (географическая территория);
- типы и характеристики волокон оптического кабеля;
- предлагаемое оборудование известного производителя;
- необходимость защиты секций оптического мультиплексирования или отдельных оптических каналов.

Пример постановки задачи расчёта представлен таб.1.

Табл.1. Требуемое число оптических каналов по направлениям

№	Направление	Число оптических каналов рабочих/для развития	Скорость передачи в канале и информационный поток
1	А-Б	2	10 Гбит/с Ethernet
2	А-В	2	10 Гбит/с Ethernet
3	А-Г	2	10 Гбит/с Ethernet
4	А-Д	2	10 Гбит/с Ethernet
5	А-Е	2/6	10 Гбит/с Ethernet

Расстояния между узлами линейной сети:

А-Б 82 км; Б-В 77 км; В-Г 168 км; Г-Д 83 км; Д-Е 40км.

Оптический кабель компании «Еврокабель» для прокладки в грунт ОГЦ-24Е-7 с центральным оптическим модулем, в котором расположены 24

одномодовых волокна стандарта G.652, с бронепокровом из одного повива стальных оцинкованных проволок, с наружной оболочкой из материала, не распространяющего горение, на растягивающее усилие 7кН. Погонное затухание волокна $<0,2$ дБ/км на волне 1550 нм. Величина хроматической дисперсии <18 пс/нм×км в диапазоне волн 1530 – 1560 нм. Величина коэффициента поляризационной модовой дисперсии $<0,2$ пс/√км.

Предлагаемое оборудование ROADM NEC DW4200 с волновыми блокираторами и узлами оптической кроссовой коммутации. Максимальные по длине участки передачи с точки зрения потерь оптической мощности для участков увеличенной протяженности (без учёта потерь в компенсаторах хроматической дисперсии КХД) в волокне G.652: 23 дБ; 25 дБ; 30 дБ; 33 дБ. С учетом потерь в компенсаторе хроматической дисперсии: 20 дБ (в волокне 11дБ); 21 дБ (в волокне 12 дБ); 22 дБ (в волокне 13 дБ); 23 дБ (в волокне 14 дБ); 24 дБ (в волокне 15 дБ); 25 дБ (в волокне 16 дБ); 26 дБ (в волокне 17 дБ); 27 дБ (в волокне 18 дБ).

Без использования отдельных волоконно-оптических линий для защиты соединений.

Этапы расчета характеристик оптических каналов:

- выбор оптического диапазона длин волн для организации связи, интервала между несущими частотами и конкретных несущих частот из стандартной сетки (CWDM или DWDM) с учётом перспективы развития;

- оценка необходимости размещения промежуточных станций оптического усиления, компенсаторов хроматической дисперсии между заданными узлами сети и применения оптического оборудования заданного производителя в подходящем варианте комплектации по числу каналов и энергетическому потенциалу;

- составление схемы организации связи с указанием организуемых каналов по всем участкам между станциями, расстояниями между узлами и в том числе с возможными оптическими усилителями, компенсаторами хроматической дисперсии;

- расчёт OSNR (см. главу 6) с использованием характеристик группового оптического оборудования и транспондеров отдельных каналов, сравнение рассчитанного и допустимого OSNR в канале с принятием решения о использовании FEC;

- построение диаграммы уровней оптического канала с указанием уровней передачи и OSNR;

- расчёт остаточной хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии волоконной линии и оптического оборудования ROADM, PXC и сравнение с допустимой величиной дисперсии в канале;

- при каскадировании более 8 оптических элементов должна рассчитываться общая полоса пропускания оптического канала, которая должна соответствовать полосе частот канала при заданной скорости передачи цифровых данных и подходящем виде внешней модуляции, т.е.

$$\Delta F_{\text{оптического канала}} > \Delta F_{\text{оптического сигнала}}$$

При этом необходимо учесть, что стандартной методики (от ITU-T или др. организаций), дающей точный результат расчёта полосы канала пока нет, однако есть примеры [3,4] по приближенной оценке относительно полосы 12,5 ГГц, которыми можно воспользоваться.

В случае несоответствия полос частот канала и сигнала должны быть пересмотрены решения по выбору оптических несущих, интервала между ними. Также допустима замена оборудования на оборудование с более широкой полосой пропускания для оптических каналов. Или необходим выбор транспондеров со схемами оптического кодирования и модуляции для известных полос частот канала уже выбранного оборудования.

Конечным результатом выполнения всех этапов по расчёту оптических каналов должна быть схема организации связи с обозначением всех видов оборудования (мультиплексоров, транспондеров), соединений, величин OSNR в каждом канале и выводами о возможности пропуска через оптические каналы указанного по технологии (SDH, Ethernet и т.д.) трафика.

Выполнение этапов расчёта характеристик оптических каналов

1. В предложенном оборудовании предусмотрено использование двух оптических диапазонов (C, L), в каждом по 40 оптических каналов (DWDM) с интервалом 100 ГГц и скоростью передачи до 10 Гбит/с. Меньшие потери мощности оптических сигналов в стекловолокне и меньшая дисперсия находятся в диапазоне C (1530-1562 нм). Предлагается использовать частоты $195,90 - 0,1 \times n$ ТГц, где $n=1,2,3,\dots,16$. Эти частоты соответствуют волнам: 1530,33; 1531,12; 1531,90; 1532,68; 1533,47; 1534,25; 1535,04; 1535,82; 1536,61; 1537,4; 1538,19; 1538,98; 1539,77; 1540,56; 1541,35; 1542,14 нм.

2. Для оценки необходимости размещения промежуточных станций оптического усиления, компенсаторов хроматической дисперсии между заданными узлами сети производится расчёт затухания и дисперсии волокон оптического кабеля для выбранного диапазона волн.

Расчёт затухания рекомендуется произвести по формуле (1) согласно рекомендации МСЭ-Т G.652 [102]:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y, \quad (1)$$

где: α типовой коэффициент затухания волокна в кабельной линии (на волне 1550 нм 0,19 дБ/км); α_s средние потери в месте сращивания волокон (0,05 дБ); x – число мест сращивания в линии между двумя соседними мультиплексорами; α_c средние потери на разъёмных соединителях (0,1 дБ); y – число разъёмных соединителей; L длина линии между двумя соседними мультиплексорами (км). В расчёт также необходимо принять эксплуатационный запас (на устранение возможных повреждений и старение кабеля). Его величина устанавливается по

статистике повреждений в местах прокладки существующих кабельных линий. В расчёте следует принять 1 дБ для линии длиной до 100 км и 3 дБ для линии длиной от 100 до 200 км.

Расчёт хроматической дисперсии рекомендуется произвести по формуле (G.652):

$$D(\lambda) = L[D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550)] \text{ (пс/нм)}, \quad (2)$$

где: L длина линии между двумя соседними мультиплексорами (км); D_{1550} коэффициент хроматической дисперсии на волне 1550 нм для G.652 (17 пс/нм×км); S_{1550} крутизна хроматической дисперсии на волне 1550 нм (0,056 пс/нм²×км); λ текущая длина волны (нм).

Типовая строительная длина кабеля 4 – 6 км. Также возможны длины до 10 км.

В расчёте принята строительная длина 6 км. Число сварных стыков волокон вычисляется по формуле:

$$x = E \left[\frac{L}{L_c} - 1 \right], \text{ где } E \text{ обозначает целое число, } L_c \text{ строительная длина}$$

кабеля. Число разъёмных соединителей 4. Итоги расчёта представлены в табл.2.

Табл. 2. Итоги расчёта затухания волоконно-оптической линии (ВОЛ)

Направление	Длина, км	Затухание, дБ	Энергетический потенциал оборудования, дБ	Вывод
А-Б	82	16,43+1	27 (18+ КХД)	Норм. каскад
Б-В	77	15,63+1	26 (17+КХД)	Норм. каскад
В-Г	168	33,67+3	33 без учёта КХД	Необходим усилитель
Г-Д	83	16,83+1	27 (18+КХД)	Норм. каскад
Д-Е	40	8,3+1	20 (11+КХД)	Норм. каскад

Только для одного участка (В-Г) оптической сети требуется использование промежуточной станции усиления. В реальных условиях такая станция с оптическим усилителем размещается на защищённой территории населённого пункта, промышленного или иного объекта, на котором имеется надёжное энергообеспечение и подъезд для транспорта. При этом желательно разбиение всего участка на две равные секции усиления. В предлагаемом примере деление по расстоянию составляет (В - оптич. усилитель 80км, оптич. усилитель – Г 88км). Промежуточный усилитель должен содержать компенсатор дисперсии для линии в 80 км и иметь усиление не менее 17 дБ (26 дБ с КХД). В обратное направление «Г - оптич. усилитель» должен быть помещён усилитель с повышенным коэффициентом усиления т.к. расстояние 88 км и усиления нормального каскада недостаточно (требуется около 19 дБ). Предлагается использовать каскад повышенного усиления на 23 дБ со встроенным

компенсатором дисперсии, затухание которого уже учтено. Такой же каскад необходимо применить на участке «оптич. усилитель - Г».

Далее производится расчёт хроматической дисперсии для всех длин оптического кабеля с волокнами G.652 с целью принятия решения о использовании компенсаторов дисперсии (КХД), которые выпускаются для известных диапазонов волн (1525-1565 нм) и длин компенсируемых участков (10, 20, 40, 60, 80, 100 км). Примеры характеристик КХД можно найти по адресам www.avanex.com, <http://www.prointech.ru/catalog/dwdm/kompensatory-dispersii.html>

После подстановки в соотношение (2) длин волн оптических каналов от 1530 нм до 1542 нм получено изменение дисперсии в пределах от 15,9 пс/нм×км до 16,5 пс/нм×км, а итоги расчётов по всем участкам представлены в табл. 3.

Табл. 3. Итоги расчётов хроматической дисперсии ВОЛ

Параметры	А-Б	Б-В	В - ОУ	ОУ - Г	Г-Д	Д-Е
Расстояние, км	82	77	80	88	83	40
D(1530 нм)= 15,9 пс/нм×км	1303,8 пс/нм	1224,3 пс/нм	1272 пс/нм	1399,2 пс/нм	1319,7 пс/нм	636 пс/нм
D(1542 нм)= 16,5 пс/нм×км	1353 пс/нм	1270,5 пс/нм	1320 пс/нм	1452 пс/нм	1369,5 пс/нм	660 пс/нм
КХД, км, пределы компенсации, пс/нм	80 1183-1448	80 1183-1448	80 1183-1448	80 1183-1448	80 1183-1448	40 588-727
Вносимые потери КХД, дБ	От 6 до 6,9	От 6 до 6,9	От 6 до 6,9	От 6 до 6,9	От 6 до 6,9	От 3,2 до 4,1

Расчёт хроматической дисперсии показывает, что она практически полностью подавляется КХД на всех участках и для всех длин волн за одним исключением для участка ОУ-Г, где недокомпенсация может составить 4 пс/нм. Эта величина может быть компенсирована транспондерами каналов. В качестве КХД предлагается использовать отрезки волокон с отрицательной дисперсией DCF (Dispersion Compensation Fiber), которые выполнены в виде катушек – модулей (DCFМ, DCM-80-SMF-C и DCM-40-SMF-C AVANEX), размещаемых в каркасах оборудования ROADМ/РХС.

Необходимо также отметить, что расчёт дисперсии должен учитывать и ПМД, которую создают волоконные световоды, КХД, мультиплексоры и кроссовые коммутаторы. Этот расчёт выполняется совместно с расчётом остаточной хроматической дисперсии.

3. Схема организации связи примера линейной оптической сети с ROADМ представлена на рис.1, где обозначены: оптические мультиплексоры оконечных станций А и Е; мультиплексоры ROADМ станций Б, В, Г, Д; промежуточный оптический усилитель ОА; расстояния между станциями в км; компенсаторы дисперсии DCF80 и DCF40, совмещаемые с приёмными устройствами;

организуемые оптические каналы с 1 по 10; каналы на перспективное развитие с 11 по 16; суммарные ёмкости каналов в линейных трактах (10+6, 8+6, и т.д.).

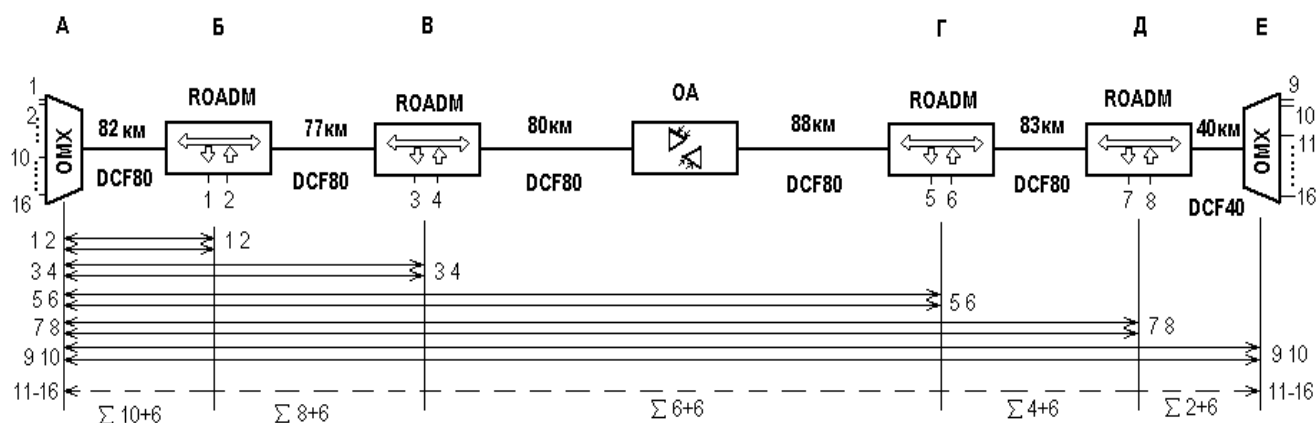


Рис.1. Схема организации связи линейной оптической сети с ROADM

4. Расчёт оптического отношения OSNR производится с использованием технических характеристик DW4200 [3, 5] и расчётных соотношений (6.1 - 6.5) из главы 6.

Изменение величины OSNR в одном ONE можно рассчитать:

$$OSNR_{out} = -10 \lg \left(10^{-0,1(OSNR_{in})} + 10^{-0,1(P_{in} - NF - 10 \lg(hf\Delta f))} \right),$$

где: $OSNR_{out}$ отношение оптический сигнал/шум на выходе ONE; $OSNR_{in}$ отношение оптический сигнал/шум на входе ONE; P_{in} уровень мощности сигнала оптического канала на входе ONE; NF коэффициент шума ONE; h постоянная Планка, согласованная с уровнем мощности (мДж×с); f центральная частота оптического канала (Гц); Δf полоса частот оптического канала (Гц).

При каскадировании некоторого N-ного числа ONE результирующее значение $OSNR_{out}$ можно рассчитать:

$$OSNR_{out} = -10 \lg \left(10^{-0,1(P_{in1} - NF_1 - 10 \lg(hf\Delta f))} + 10^{-0,1(P_{in2} - NF_2 - 10 \lg(hf\Delta f))} + \dots + 10^{-0,1(P_{inN} - NF_N - 10 \lg(hf\Delta f))} \right),$$

где: $P_{in1}, P_{in2}, \dots, P_{inN}$ уровни мощности оптического канала на входах различных оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал; NF_1, NF_2, \dots, NF_N коэффициенты шума оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал.

При определении OSNR также могут учитываться оптические шумы нелинейного происхождения в волоконных световодах, оптических усилителях, оптических коммутаторах и т.д. Они учитываются в виде штрафа $OSNR_{штраф}$, который учитывает помехи нелинейного происхождения, перекрёстные помехи между оптическими каналами, поляризационные потери, уменьшение полосы канала в ROADM и др.

Итог расчёта представлен в табл. 4, где использованы данные из табл. 2 для определения затухания по участкам оптического кабеля с учётом потерь компенсаторов хроматической дисперсии $A_{\text{КХД}}$. Также в таблице применены обозначения: оуА, оуБ и т.д., оптические усилители передатчиков станций А, Б и т.д.; участки обозначены А-Б, Б-В, оптические усилители ОА и т.д. Расчёт производится для самого протяжённого оптического канала участка А-Е и наихудших условий (40 оптических каналов и минимальный возможный уровень передачи в каждом канале +2,5дБм при учёте максимума коэффициентов шума). Контрольные точки используются для построения диаграммы уровней передачи и отметок OSNR.

Табл. 4. Расчёт OSNR для одного оптического канала участка А-Е

Участок	оуА	А-Б	оуБ	Б-В	оуВ	В-ОА	ОА-Г	оуГ	Г-Д	оуД	Д-Е
$\alpha \times L$, дБ		17,43		16,63		17,25	18,82		17,83		9,3
$\alpha \times L + A_{\text{КХД}}$, дБ		24,33		23,53		24,15	25,72		24,73		13,3
$P_{\text{вх}}$, дБ	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5	+2,5	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5
$P_{\text{вых}}$, дБ	+2,5	-21,83	+2,5	-21,03	+2,5	-22,65	-23,22	+2,5	-22,23	+2,5	-10,8
NF, дБ	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	7,5	7,8	6,5	6,7	6,5	6,7
OSNR, дБ	38,2	27,63	26,8	24,5	24,3	22,14	20,32	20,3	19,44	19,38	19,33
Контрольная точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Полученные значения OSNR для оптического канала на скорости 10 Гбит/с при модуляции NRZ со скремблированием показывают в сравнении с характеристиками стандартных одноканальных интерфейсов, например, DN100C-2A2(C)F, что выполняется требование по минимальной величине $OSNR_{\text{допуст.}} = 16$ дБ. Однако с учетом дополнительных ухудшающих факторов (допустимый штраф $OSNR_{\text{штраф}} = 5$ дБ за дисперсионные потери, нелинейные искажения и с учётом эксплуатационного запаса 2 - 3дБ) требование по устойчивости приёма (16 дБ) может быть не выполнено. В таком случае нужно перераспределить оптические усилители или выбрать усилители с меньшим коэффициентом шума (например, рамановские), применить транспондерные блоки с более эффективным FEC и пониженным допустимым значением $OSNR_{\text{допуст.}}$.

Построение диаграммы уровней с отметками OSNR позволит наглядно определить проблемные участки оптической сети.

5. Построение диаграммы уровней передачи и OSNR производится в одну сторону от А к Е для упрощения и наглядного отображения, однако реально нужно рассчитывать и строить диаграмму и в обратную сторону от Е к А (рис. 2).

На входе OMX (станция А) показан уровень мощности оптического сигнала, поступающего от передатчика транспондера (-6,3 дБм). Оптический

мультиплексор – пассивное устройство с потерями мощности 5 дБ. Итоговый уровень мощности -11,3 дБм. После канального аттенюатора, мультиплексора и оптического усилителя передачи уровень мощности составляет +2,5 дБм.

Далее в станциях Б, В, Г, Д, Е также учтены потери мощности внутри станций и шумы оптических усилителей на входе и выходе. В каждой станции, включая промежуточный оптический усилитель ОА, определено значение OSNR.

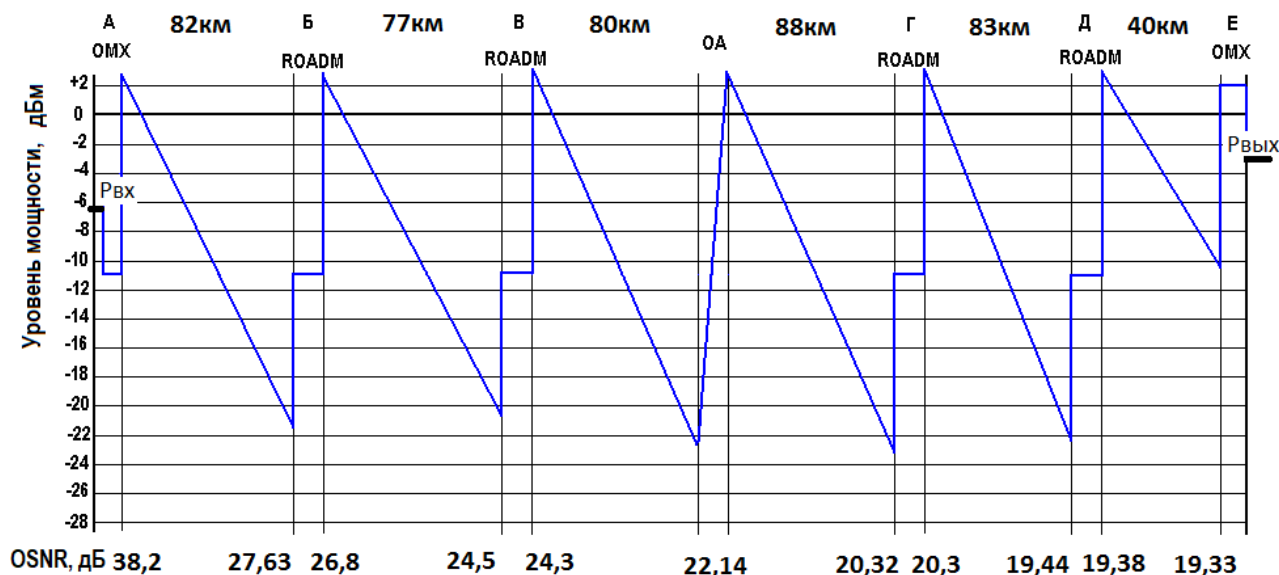


Рис. 2. Диаграмма уровней оптического канала и точки контроля OSNR

Наиболее проблемный участок, где существенно понижается OSNR, В-Г с оптическим усилителем. Все оптические каналы после этого участка не укладываются в норматив по OSNR.

Если использовать в этой линии только 16 оптических каналов вместо 40 (как указано по техническим характеристикам), то можно составить расчёт максимального уровня мощности для каждого канала при максимальной допустимой мощности всех каналов +18,5 дБм:

$$P_{\text{OCh}} = P_{\text{max}} - 10 \lg N = +18,5 \text{ дБм} - 10 \lg 16 = +6,5 \text{ дБм}.$$

При этом пересчитанное значение OSNR=23 дБ для самого протяжённого оптического канала (А-Е). Применение уровня передачи +6,5 дБ позволит увеличить OSNR до нормативного значения (см. выше норматив 21дБ). Также несколько повысить OSNR (0,5-1,0 дБ) можно увеличив уровень мощности оптического канала на входе каждого оптического усилителя передачи от -11,3 дБм до -3 дБм, что выполняется управляемыми аттенюаторами в схеме WB.

Также для увеличения OSNR в оптических каналах можно использовать на проблемных участках оптические интерфейсы для повышенной дальности передачи с функциями супер FEC. Такое решение позволяет компенсировать

ухудшение OSNR, вызванное частыми включениями ROADM и связанными с этим переходными помехами между каналами, сужение полосы передаточной характеристики оптического канала [3].

6. Определение остаточной хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии необходимо для оценки правильности выбора компенсаторов дисперсии и транспондеров по устойчивости к дисперсии.

В приведённом примере уже вычислена остаточная хроматическая дисперсия 4 пс. Далее подсчитывается ПМД стандартного стекловолокна ($\sigma = 0,5$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$) на всём протяжении линии и компенсаторов хроматической дисперсии. Также должна учитываться дисперсия в ROADM и оптических усилителях.

Расчётная формула [3, 15]:

$$D_{\text{ПМД}} = [(\sigma_{\text{ПМД}} \sqrt{\Sigma L})^2 + \Sigma D_{\text{ПМД}80}^2 + D_{\text{ПМД}40}^2 + \Sigma D_{\text{ROADM}}^2 + D_{\text{OA}}^2]^{1/2}$$

После подстановки численных значений:

$$D_{\text{ПМД}} = [(0,5 \text{ пс} / \sqrt{\text{км}} \times \sqrt{450 \text{ км}})^2 + 5 \times (0,7 \text{ пс})^2 + (0,5 \text{ пс})^2 + 4 \times (1 \text{ пс})^2 + (1 \text{ пс})^2]^{1/2} = 10,95 \text{ пс}$$

В стандартном интерфейсе для транспондера DW4200 нет указания на величину допустимой дисперсии. Однако международными стандартами (G.698.2) такая величина нормирована, например, для транспондера с интерфейсом DW100C-2A2(C) допустимая хроматическая дисперсия составляет (от -300 до +800 пс/нм), а величина поляризационной дисперсии нормируется 30 пс. Полученные числовые данные показывают, что в рассчитанной схеме для самого протяженного оптического канала выполняются условия по дисперсии. Также необходимо учитывать, что при более высокой скорости передачи (40 Гбит/с и более) и использовании различных видов модуляции (DB, NRZ, DPSK, DQPSK и т.д.) требования по ПМД могут быть более жесткими, а их несоблюдение приведёт к увеличению штрафа OSNR и, как следствие, к пересмотру возможностей оптических интерфейсов в сторону увеличения энергетического потенциала. Кроме того, потребуется учесть статистические коэффициенты Максвелла для ПМД оптических компонентов (*comp*) [3, 15], которые используются в качестве множителей для суммарной квадратичной величины:

$$DGD_{\text{max } OCh} = [DGD_{\text{max } FO}^2 + S^2 \sum_i PMD_{\text{comp}}^2]^{1/2},$$

где DGD – дифференциальная групповая задержка (в оптическом канале OCh , в волоконно-оптической линии FO); S – коэффициент Максвелла ($3 < S < 4,6$).

При использовании модуляции NRZ со скремблированием известны указания по нормированию величины ПМД, т.е. $DGD_{\text{max}} \leq 0,1T$ (периода следования импульсов) [3, 15].

2. Расчёт характеристик каналов оптической сети типа «кольцо»

В кольцевой оптической сети необходимо соблюдать общий порядок расчёта, который приведён в разделе 1.

На рис. 3 представлена схема организации связи в оптическом кольце с однонаправленными оптическими каналами. Такая схема используется для построения внутризоновых транспортных сетей. В схеме указаны: узлы с размещением ROADM (8 узлов, обозначенных буквами); расстояния между узлами в километрах; выделяемые и вводимые оптические каналы в каждом узле (по одному OCh). Оптический кабель со стандартными одномодовыми волокнами G.652. Предполагаемое оборудование ROADM DW4200. Необходимо выполнить основные расчёты оптических каналов аналогично ранее рассмотренному примеру.

В табл. 5 указано число проектируемых оптических каналов с учетом перспективного развития транспортной сети, предполагаемая скорость передачи и технология транспортировки. Общее число оптических каналов с однонаправленной передачей и учётом перспективы развития составит 21 на каждой секции мультиплексирования с односторонней передачей в одном волокне. При 2-х волоконной схеме организации секций мультиплексирования первое волокно рабочее, а второе волокно предназначено для резервирования.

В станции А устанавливается 7 транспондеров для работы и предусматриваются места для размещения 14 транспондеров. В других станциях (Б, В, ..., З) устанавливаются по одному транспондеру и предусматриваются места для размещения 2 транспондеров для развития.

Диапазон волн стекловолокна - С (1530-1562 нм). Используются волны из сетки плотного мультиплексирования DWDM с частотным интервалом 100 ГГц: 1530,33 нм; 1531,12 нм; 1531,90 нм; 1532,68 нм; 1533,47 нм; 1534,25 нм; 1535,04 нм, которые указаны в техническом описании оборудования.

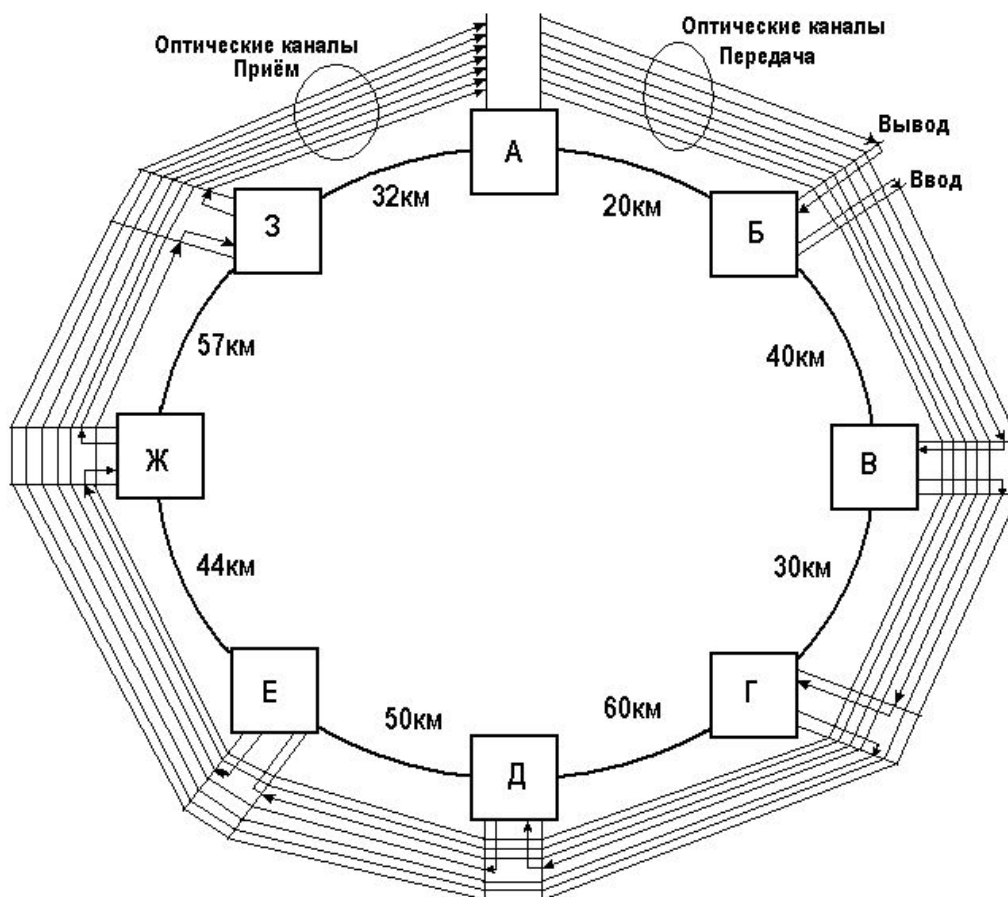


Рис. 3. Схема организации связи в кольцевой сети с оптическими однонаправленными каналами

Табл. 5. Требуемое число оптических каналов по направлениям

№	Направление	Число оптических каналов рабочих/для развития	Скорость передачи в канале и информационный поток
1	А-Б	1/2	10 Гбит/с Ethernet
2	А-В	1/2	10 Гбит/с Ethernet
3	А-Г	1/2	10 Гбит/с Ethernet
4	А-Д	1/2	10 Гбит/с Ethernet
5	А-Е	1/2	10 Гбит/с Ethernet
6	А-Ж	1/2	10 Гбит/с Ethernet
7	А-З	1/2	10 Гбит/с Ethernet

Расчёт параметров оптического канала производится для наиболее протяженного канала А-З, который проходит через 6 промежуточных ROADМ, через мультиплексирование в станции А и демультиплексирование в станции З.

С учётом конфигурации оборудования ROADМ в расчётах необходимо учесть потери оптической мощности в волоконном кабеле, в стыках, в мультиплексорах и демультиплексорах, в компенсаторах хроматической дисперсии и остаточную дисперсию. Также нужно учесть усиление оптических

усилителей и шумы спонтанной эмиссии, вносимые этими усилителями. В итоге расчёта должно быть определено значение OSNR, которое будет зависеть и от комплектующих устройств оптической передачи и приёма.

Необходимо оценить возможности транспондеров по OSNR, по компенсации хроматической дисперсии, по максимальному штрафу оптического тракта для выбора транспондера из данных производителя или данных стандартов.

Для наглядности выполнения расчётов составлена схема оптического канала со всеми его составляющими рис. 4. и табл. 6 с параметрами расчётов по отдельным точкам (с 1 по 14) схемы канала. Расчет производится относительно максимального допустимого уровня мощности многоканального (многоволнового) оптического сигнала на входе в стекловолокно (+18,5 дБм) для выбранного оборудования.

При этом предполагается организация 21 оптического канала на всех участках кольцевой сети, согласно исходного задания на расчёт. По расчётной формуле определено максимальное значение уровня мощности оптического сигнала одного канала на входе в оптическую линию:

$$P_{\text{OCh}} = P_{\text{max}} - 10 \lg N = +18,5 \text{ дБм} - 10 \lg 21 = +5,3 \text{ дБм}$$

Уровень мощности оптического сигнала от транспондера передачи на входе линейного оптического усилителя составляет -11,3 дБм.

Линейные потери оптической мощности определяются по формуле:

$$A = \alpha L + \alpha_s x + \alpha_c y + A_{\text{КХД}},$$

где: α – километрические потери в стекловолокне кабеля (0,22 дБ/км с учётом запаса на повреждения); L – длина оптической кабельной секции (км) со строительными длинами 6 км; α_s – потери на сварных стыках (0,05 дБ на стык); x – число сварных стыков; α_c – потери на разъёмных стыках (0,1 дБ на стык, в одной секции $y=4$ стыка); $A_{\text{КХД}}$ – затухание, вносимое компенсатором хроматической дисперсии (используются данные DCM от AVANEX для длин 20 км (2,7 дБ), 40 км (4,1 дБ), 60 км (5,5 дБ)).

Расчётные соотношения для OSNR использованы аналогично выше приведённым для линейной цепи.

Расчёт OSNR показывает, что его величина не меньше нормы для оптического канала со стандартным интерфейсом DW100C-2A2(C) (рек. G.698.2). Даже с учетом максимального штрафа 5 дБ OSNR=22 дБ, что больше нормативного 16 дБ [15].

В приведённом примере вычисляется остаточная хроматическая дисперсия и подсчитывается ПМД стандартного стекловолокна ($\sigma_{\text{ПМД}} = 0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$) на всём протяжении линии и компенсаторов хроматической дисперсии. Также учитывается дисперсия в ROADMs.

Расчётная формула для остаточной хроматической дисперсии [3]:

$$D_{\text{Хрост}} = \sigma_{\text{Хр}} \Sigma L + \Sigma D_{\text{КХД}},$$

где $\sigma_{\text{хр}}$ удельная хроматическая дисперсия для волокна G.652 в диапазоне волн 1530-1540 нм от 15,9 пс/нм×км до 16,5 пс/нм×км.

$$D_{\text{хр ост}} = 16,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \times \text{км}} \times 301 \text{ км} + (-4800 \frac{\text{пс}}{\text{нм}}) = 166,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм}}.$$

Расчётная формула для ПМД и расчёт [4]:

$$D_{\text{ПМД}} = [(\sigma_{\text{ПМД}} \sqrt{\Sigma L})^2 + \Sigma D_{\text{ПМД}60}^2 + \Sigma D_{\text{ПМД}40}^2 + D_{\text{ПМД}20}^2 + \Sigma D_{\text{ROADM}}^2]^{1/2}$$

$$D_{\text{ПМД}} = [(0,5 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}} \times \sqrt{301 \text{ км}})^2 + 2 \times 0,7^2 + 4 \times 0,5^2 + 0,4^2 + 7 \times 0,1^2]^{1/2} = 3,28 \text{ пс}$$

Расчеты дисперсии показывают, что остаточная хроматическая и поляризационная модовая дисперсии в совокупности незначительны и существенно меньше компенсационных возможностей транспондеров, которые имеют диапазон компенсации от величины -300 пс/нм до +800 пс/нм.

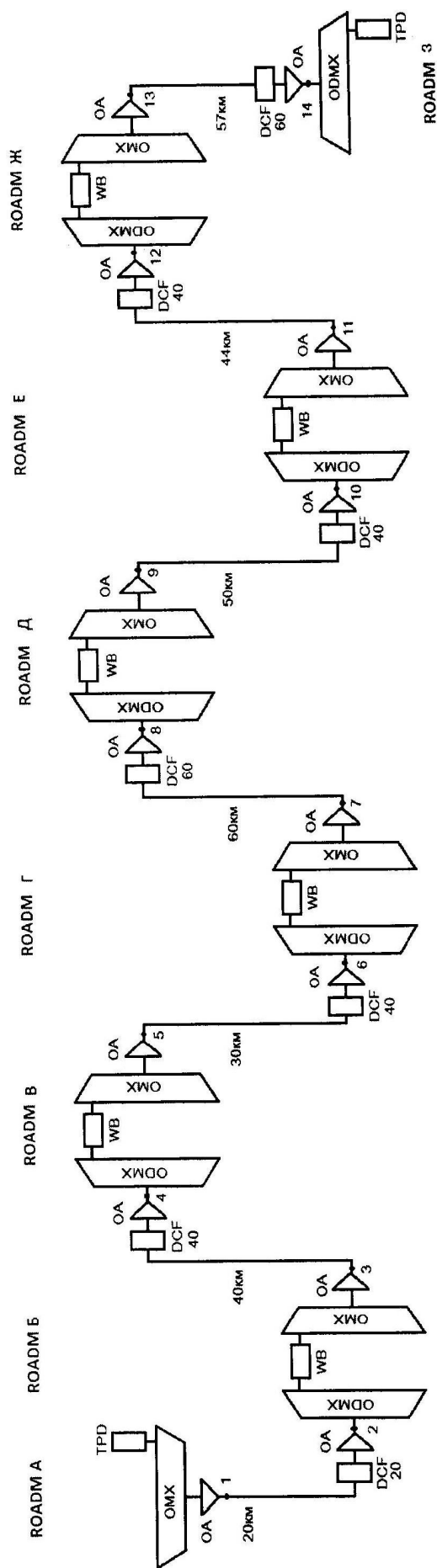


Рис. 4. Схема организации оптического канала кольцевой сети на участке А-3

Табл. 6. Расчёт оптического отношения сигнал/шум в протяжённом оптическом канале на участке А-3

Вычисляемый параметр	Точки на схеме для определения параметров оптического канала													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\alpha \times L$				13,6		11,3		19,55		15,9		14,53		18,9
$\alpha_s x + \alpha_{cy} + A_{ххД}, дБ$														
$P_{вх}, дБ$	-11,3	+5,3		+5,3		+5,3		+5,3		+5,3		+5,3		+5,3
$P_{вых}, дБ$	+5,3	-2,35	+5,3	-8,36	+5,3	-6	+5,3	-14,2	+5,3	-10,6	+5,3	-9,23	+5,3	-13,6
NF, дБ	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,7
OSNR, дБ	38,2	37,3	35	34	32,6	32,2	31,15	29,8	29,2	28,8	28,24	28	27,6	27

3. Расчёт характеристик когерентных каналов оптической сети

При реконструкции существующих оптических сетей и проектировании новых сетей различного масштаба и протяженности оптических каналов часто используются интерфейсы когерентного типа на скорости от 100 Гбит/с и выше (200 Гбит/с, 400 Гбит/с и до 1 Тбит/с). При этом в существующем оборудовании возможна замена интерфейсов скорости 10 Гбит/с и 40 Гбит/с на интерфейсы скорости 100 Гбит/с без каких-либо изменений в конфигурации оборудования. Однако при этом необходимо проведение проверочных расчётов для оценки OSNR на существующей сети в наиболее неблагоприятных режимах (на максимальной скорости, наличии нелинейных помех, частом включении ROADM и т.д. см.рис.6).

Особенностью когерентных интерфейсов является автоматическая компенсация дисперсионных искажений в широком диапазоне ($\pm 40\,000$ пс/нм, $\pm 70\,000$ пс/нм). При этом могут сохраниться определённые ограничения на ПМД (табл.7), девиацию центральной частоты оптического канала, ширину спектральной линии и др.

Табл.7. Оптические характеристики для когерентного канала на основе 100G DP-(D)QPSK Coherent Tunable Transponder

	Параметр	Ед. измер.	Миним.	Типовое.	Максим.
T _x	Скорость	Гбит/с	111,81/127,16		
	Волновой интервал	нм	1528,77		1563,66
	Оптическая мощность	дБм	+1		+4
	Ширина спектральной линии	кГц		100	500
	SMSR (подавление боковых мод)	дБ	40		
	RIN (шум передатчика)	дБ/Гц			-140
R _x	Диапазон принимаемой оптической мощности	дБм	-20		0
	Время взаимодействия	мс			25
	Компенсация дисперсии	пс/нм		$\pm 40\,000$	
	Устойчивость OSNR при BER= 10^{-2} для 127,16 Гбит/с	дБ		14	
	Устойчивость к ПМД	пс	50		
	Устойчивость к частотной девиации	Гц	-2,5		+2,5

Ниже приводится пример упрощенной оценки OSNR для 100 Гбит/с передачи в оптическом канале оптической сети типа «линейная цепь» при замене интерфейса 10 Гбит/с на интерфейс 100 Гбит/с. В примере используется схема рис.1 для линейной цепи с исключением компенсаторов хроматической дисперсии (рис.5.), т.к. транспондеры позволяют на указанных дистанциях оптических каналов полностью компенсировать ХД (табл.7). Достаточно полный расчёт параметров когерентных оптических каналов с учётом нелинейных искажений и частичной компенсации дисперсии приводится в [103].

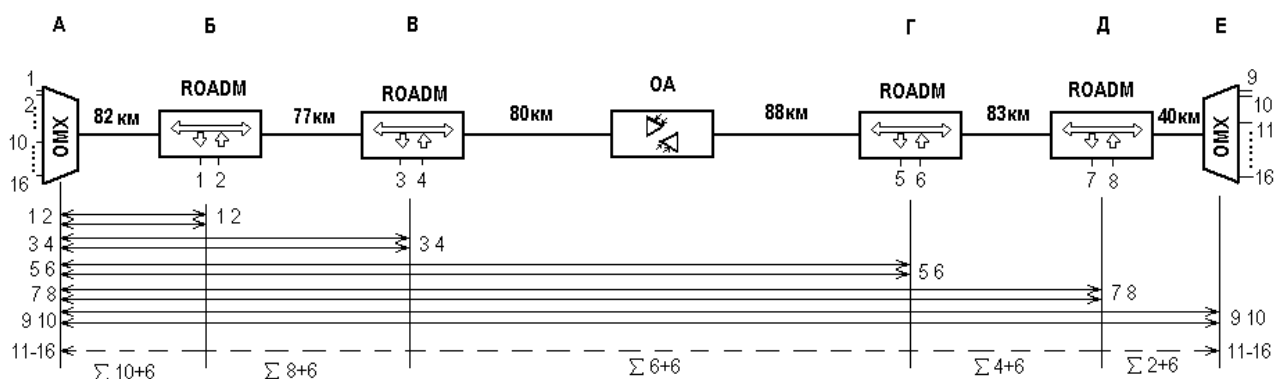


Рис. 5. Схема организации оптических каналов 100 Гбит/с в линейной цепи для реконструкции

Устранение компенсаторов дисперсии внесёт изменение в диаграмму уровней передачи, потребует коррекции уровней оптических сигналов на отдельных секциях мультиплексирования и возможно замены усилителей. Исходя из минимального уровня мощности оптического передатчика транспондера (+1 дБм), количества оптических каналов (40 каналов со скоростью 100 Гбит/с в каждом) и соответствующей допустимой величины совокупной мощности не более +18,5 дБм согласно технических данных, определяется максимальный уровень мощности одного оптического канала на выходе бустерных усилителей всех станций (терминалов OMX, ROADM, оптического усилителя):

$$P_{\text{OCh}} = P_{\text{max}} - 10 \lg N = +18,5 - 10 \lg 40 = 2,5 \text{ дБм}$$

Далее производится расчёт диаграммы уровней и отношения OSNR (табл. 8 и с учётом возможных ограничений на рис.6). Полученные значения OSNR=27,1 дБ/0,1нм сравниваются с допустимым по табл. 7 (OSNR=14 дБ/0,1нм). Величина 0,1нм является нормативным параметром, которому соответствует шум ASE равный -58 дБм. Результирующая хроматическая дисперсия не превышает 6000 пс/нм, т.е. существенно меньше 40 000 пс/нм из данных когерентного транспондера. Пример характеристик транспондера 400 Гбит/с приведён в прилож.7.

Табл. 8. Расчёт OSNR для одного оптического канала 100 Гбит/с участка А-Е

Участок	оуА	А-Б	оуБ	Б-В	оуВ	В-ОА	ОА-Г	оуГ	Г-Д	оуД	Д-Е
$\alpha \times L$, дБ		17,43		16,63		17,25	18,82		17,83		9,3
$P_{\text{вх}}$, дБм	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5	+2,5	-11,3	+2,5	-11,3	+2,5
$P_{\text{вых}}$, дБм	+2,5	-14,93	+2,5	-14,13	+2,5	-14,75	-16,32	+2,5	-15,33	+2,5	-6,8
NF, дБ	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	7,5	7,8	6,5	6,7	6,5	6,7
OSNR, дБ	40,2	35,1	34	32,3	31,2	29,9	28,5	28,2	27,5	27,3	27,1
Контрольная точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Контрольные точки соответствуют: 1 – выход усилителя А; 2- вход ст. Б; 3 – вых. ст. Б; 4 – вход ст.В; 5 – вых. ст.В и т.д.

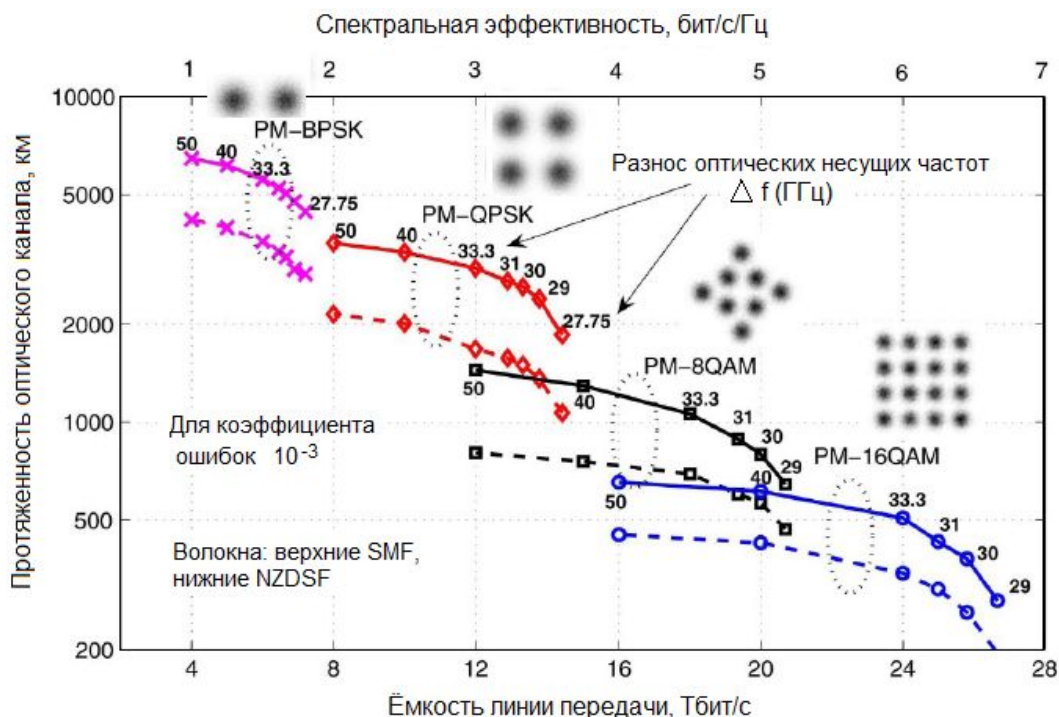


Рис.6. Ограничения для когерентных оптических каналов

В качестве заключительных замечаний необходимо указать на большое разнообразие структур оптических сетей, в которых необходимо производить расчёты характеристик оптических каналов. При этом оптические каналы должны быть сконструированы по оптимальным маршрутам (оптимальны по критериям OSNR, длине пути, числу точек коммутации, полосе передачи и др.) и также эффективны по загрузке информационным трафиком. Одним из критериев эффективности может быть минимум числа оптических каналов в каждой секции мультиплексирования, т.к. это способствует увеличению OSNR и увеличению дальности передачи между оптическими усилителями, между оптическими мультиплексорами ROADM и коммутаторами РХС. Другой критерий эффективности оптической сети это использование ресурсов каждого оптического канала для переноса оплачиваемой нагрузки – трафика пользователей с заданным качеством. Вопросам оптимального использования ресурсов оптических сетей уделяется большое внимание, как в научных исследованиях, так и в международных стандартах. Обобщённым термином определения эффективности оптической сети с 1998 года принято считать «GROOMING». Этот термин ввёл в пользование Sasaki. У термина нет однозначного перевода на русский язык, но его можно трактовать как «группирование нагрузки» или просто «группирование», или «ухаживание за нагрузкой», или «перегруппировка».

Приложение 7. Примеры основных характеристик мультиплексора ROADM и коммутатора РХС

Таблица П7.1. Характеристики ROADM с оптическим усилением [95]

Характеристики	Ед.измер.	Макс.	Миним.
Частотный интервал канала	ГГц	+12,5	-12,5
Коэффициент канала:			
от входа к выходу	дБ	+3	-3
от входа к выделению	дБ	-4	-7
от ввода к выходу	дБ	+11	-11
Девияция вносимых потерь в канале	дБ	1,5	-
Неравномерность передачи в канале (Ripple)	дБ	0,6	-
Канальная хроматическая дисперсия	пс/нм	+30	-30
Дифференциальная групповая задержка (DGD)	пс	1	-
Поляризационно-зависимые потери (PDL)	дБ	1	-
Коэффициент отражения	дБ	-30	-
Изоляция от соседних каналов при выделении	дБ	-	35
Изоляция не от соседних каналов при выделении	дБ	-	40
Подавление в канале от входа к выходу	дБ	-	40
Время реконфигурации	мс	100	1
Общий диапазон входной мощности	дБм	+19	-2
Диапазон входной мощности оптического канала:			
на входе	дБм	+3	-2
при вводе		+6	-5
Диапазон выходной мощности в канале:			
на выходе	дБм	+6	-5
при выделении	дБм	-1	-9
Отношение сигнал/спонтанный шум в канале:			
от входа к выходу	дБ	22	-
от входа к выделению	дБ	-	-
от ввода к выходу	дБ	17	-
Отражение на входе	дБ	-30	-
Отражение на выходе	дБ	-30	-
Максимальное отражение допустимое на входе	дБ	-	-27
Максимальное отражение допустимое на выходе	дБ	-	-27
Максимальная общая мощность на выходе	дБм	22	-
Изменения коэффициента передачи канала	дБ	1	-1
Длительность переходного процесса при реконфигурации	мс	3	1,5
Уменьшение коэффициента передачи при переходном процессе	дБ	2,5	0,5
Различие коэффициентов передачи многоканального сигнала (различие между каналами)	дБ	6	-
Наклон характеристики многоканальной передачи	дБ/дБ	2	-
Единообразие каналов	дБ	2	-

Примечание.

Мультиплексоры ROADM могут содержать: оптические усилители на входе (предусилители, POA) и на выходе (усилители мощности, BOA); отдельные блокирующие коммутаторы; коммутаторы типа WSS, пассивные оптические мультиплексоры и демультиплексоры, и аттенюаторы.

Таблица П7.2. Пример характеристик коммутатора РХС для 120 OTU2
[95]

Характеристики	Ед.измер.	Макс.	Миним.
Частотный интервал канала	ГГц	+12,5	-12,5
Коэффициент канала:			
от входа к выходу	дБ	+1	-1
от входа к выделению	дБ	-6	-20
от ввода к выходу	дБ	+7	-7
Девиация вносимых потерь в канале	дБ	1,0	-
Неравномерность передачи в канале (Ripple)	дБ	1,0	-
Канальная хроматическая дисперсия	пс/нм	+30	-30
Дифференциальная групповая задержка (DGD)	пс	3,0	-
Поляризационно-зависимые потери (PDL)	дБ	1,5	-
Коэффициент отражения	дБ	-40	-
Изоляция от соседних каналов при выделении	дБ	-	25
Изоляция не от соседних каналов при выделении	дБ	-	35
Подавление в канале от входа к выходу	дБ	-	40
Время коммутации	мс	10	1
Общий диапазон входной мощности	дБм	+21	-2
Диапазон входной мощности оптического канала:			
на входе	дБм	+5	-2
при вводе		+5	-2
Диапазон выходной мощности в канале:			
на выходе	дБм	+5	-2
при выделении	дБм	-8	-20
Отношение сигнал/спонтанный шум в канале:			
от входа к выходу	дБ	20	-
от входа к выделению	дБ	-	-
от ввода к выходу	дБ	20	-
Отражение на входе	дБ	-27	-
Отражение на выходе	дБ	-40	-
Максимальное отражение допустимое на входе	дБ	-	-24
Максимальное отражение допустимое на выходе	дБ	-	-10
Максимальная общая мощность на выходе	дБм	+21	-
Изменения коэффициента передачи канала при добавлении и удалении:	дБ		
3дБ		+0,3	-0,3
9дБ		+0,5	-0,5
15дБ		+1	-1,0
Длительность переходного процесса при реконфигурации	мс	3	1,5
Уменьшение коэффициента передачи при переходном процессе	дБ	2,5	0,5
Различие коэффициентов передачи многоканального сигнала (различие между каналами)	дБ	6	-
Наклон характеристики многоканальной передачи	дБ/дБ	2	-
Единообразие каналов	дБ	3	-

Примечание

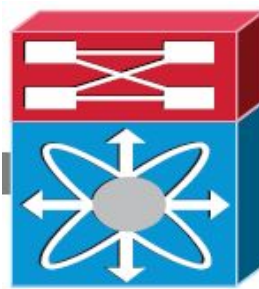
Фотонные коммутаторы PXC выполняются по четырём схемам:

- с внешними оптическими усилителями на многоканальных входах и выходах и внутренней коммутацией без доступа к отдельным каналам;
- со встроенными оптическими усилителями по каждому из многоканальных входов и выходов и внутренней коммутацией без доступа к отдельным каналам;
- с внешними оптическими усилителями, внутренней коммутацией и вводом/выводом отдельных оптических каналов с канальными оптическими усилителями на входах и выходах;
- со встроенными оптическими усилителями по каждому из многоканальных входов и выходов и внутренней коммутацией, и вводом/выводом отдельных оптических каналов и отдельными канальными усилителями.

В приведенных примерах нет характеристик электронного оборудования для контроля и управления, связи по отдельному сервисному оптическому каналу, энергопотребления и т.д.

Детальную информацию по конструкциям и характеристикам OADM, ROADM, IROADM, PXC (OXC) и их вспомогательным элементам необходимо извлекать из технической документации производителей оптических компонентов. Общие характеристики для контроля и тестирования PXC, ROADM представлены в рекомендации МСЭ-Т G.671.

Примеры обозначения на схемах оптических платформ и коммутаторов PXC



Сокращения, термины, условные обозначения



Интеллектуальная
транспортная
платформа



Маршрутизатор
IP/MPLS



Транспортная
платформа / MSPP



Ethernet-коммутатор

Пример характеристик агрегирующего транспондера MS-400E

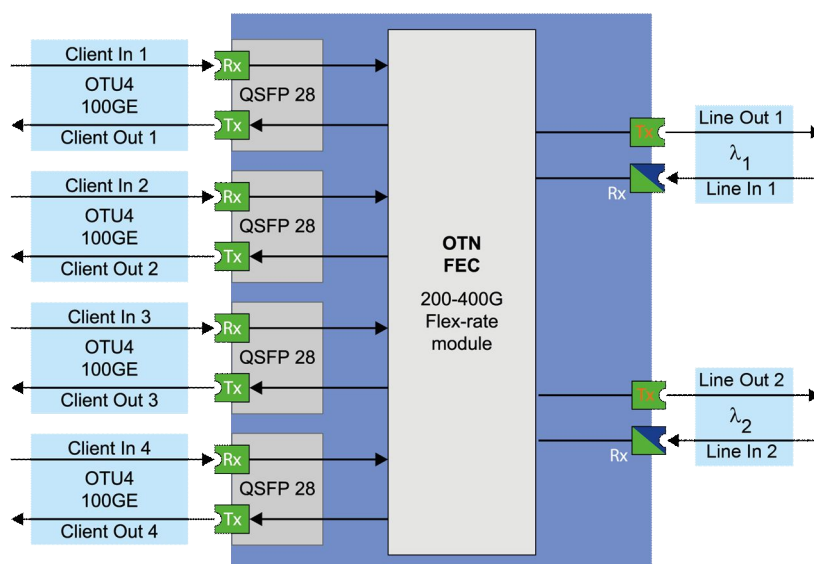
Агрегирующий транспондер (мультиплексор) сочетает в себе четыре 100 Гбит/с клиентских канала и передает их в два или один DWDM канал. MS-400E передает данные в OTN формате с использованием коррекции ошибок SD-FEC. Лазер с изменяемой конфигурацией в соответствии с ITU-T 100 ГГц позволяет организовать до 48 DWDM каналов 400 Гбит/с в С-диапазоне и сетке частот 100 ГГц. Поддерживает дифференциальный и абсолютный фазовый формат модуляции для всех режимов работы. Поддерживает передачу каналов 100G PM-QPSK, 150G PM-8QAM, 200G PM-16QAM, 300G PM-16QAM и DP-32QAM для 400G.



Конструктивное исполнение

Функциональные возможности:

- Передача до 4х клиентских сигналов: 100GE (103.125 Гбит/с) или OTU4 RS FEC (111.81 Гбит/с)
- Когерентный формат передачи 2хDP-16QAM и 1 DP-32QAM
- Коррекции ошибок SD-FEC 15% и 25%
- Перестраиваемый в С-диапазоне лазер



Функциональная схема передачи 4 x 100 Гбит/с клиентских сигналов по двум каналам 2 x DP-16QAM

Оптические характеристики

Параметр	Значения					
Линейный интерфейс	2 x 100Гбит/с	2 x 150Гбит/с	2 x 200Гбит/с	1 x 200Гбит/с	1 x 300Гбит/с	1 x 400Гбит/с
Количество интерфейсов	2	2	2	1	1	1
Тип интерфейса	LC/UPC			LC/UPC		
Формат модуляции 25% OH SD-FEC	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-QPSK	DP-16QAM	DP-32QAM
Автоматическая коррекция дисперсии	± 70 нс/нм	± 30 нс/нм		от -35 до +226,5 нс/нм	до ± 35 нс/нм	до ± 17,5 нс/нм
Диапазон рабочих длин волн передатчика	1528.7–1567.1 нм			1528.7–1567.1 нм		
OSNR _T (0,1 нм, BER=10 ⁻¹²)	10,3 дБ	15 дБ	10,2 дБ	14,5 дБ	19,8 дБ	24,7 дБ
FEC	Soft-FEC 15%, Soft-FEC 20%			Soft-FEC		
Выходная мощность	-10...+2,5 дБм			- 9 ... + 4 дБм		
Чувствительность приемника (BER=10 ⁻¹²)	-18 дБм			-13 дБм		
Перегрузка приемника (BER=10 ⁻¹²)	0 дБм			+5 дБм		
Клиентский интерфейс						
Количество	2	3	4	2	3	4
Тип интерфейса	QSFP28			QSFP28		
Стандарт интерфейса	100GE, OTU4			100GE, OTU4		
Потребляемая мощность не более	150 Вт			110 Вт		

MS-400E относится к первой ступени реализации оптических суперканалов, ёмкости которых могут наращиваться до 1Тбит/с и более путём объединения N оптических несущих частот с модуляцией DP-16QAM на скорости 100 Гбит/с.

Article printed from Компания «Т8». DWDM-системы: <http://t8.ru>- Компания «Т8».

Список сокращений на английском языке

AAL, ATM Adaptation Layer – уровень адаптации ATM
ABR, Available Bit Rate - доступная скорость в битах
ACR, Allowed Cell Rate – допустимая скорость передачи ячеек
ACSE, Association Control Service Element – сервисный элемент управления ассоциацией
ADM, Add-Drop Multiplexer – мультиплексор ввода-вывода
ADSL, Asymmetric Digital Subscriber Line - асимметричная цифровая абонентская линия
AIP, Alarm Interface Panel – интерфейсная панель аварии
AIS, Alarm Indication Signal – сигнал индикации аварийного состояния
AL, Alignment – поле выравнивания
ANSI, American National Standards Institute – Американский национальный институт стандартов
AOWC, All-optical Wavelength Converters – полностью оптический волновой конвертор
AP, Access Point – точка доступа
APD, Avalanche-Photodiode – лавинный фотодиод
API, Access Point Identifier – идентификатор точки доступа
APS, Automatic Protection Switching – автоматическое защитное переключение
APS/PCC, Automatic Protection Switching/ Protection Communication Channel – автоматическое защитное переключение/ защищаемый канал связи
ASE, Amplified Spontaneous Emission – усиленная спонтанная эмиссия
ASON, Automatic Switched Optical Network – автоматически коммутируемая оптическая сеть
ASN, Abstract Syntax Notation One – описание абстрактного синтаксиса
ASTN, Automatic Switched Transport Network - коммутируемая автоматически транспортная сеть
ATM, Asynchronous Transfer Mode – асинхронный режим передачи
AU, Administrative Unit – административный блок
AUG, Administrative Unit Group – группа административных блоков
AUG-n, Administrative Unit Group n– групповой административный блок порядка n (n=4, 16, 64, 256)
AU-n, Administrative Unit n – административный блок порядка n (n=3, 4)
AU - PTR, Administration Unit pointer – указатель административного блока
AWG, Arrayed-Waveguide Grating –решетка на волноводном массиве

BAS, Buffer Allocation Size – размер буфера
BDI, Backward Defect Indication – индикация дефекта в обратное направление
BER, Bit Error Rate – коэффициент ошибок, частота появления ошибок по битам
BIP, Bit Interleaved Parity – чётность чередующихся битов
BITS, Building Integrated Timing Supply - построения интегрированных сетей синхронизации
BLSR, Bi-directional Line-Switched Ring – двунаправленное кольцо с защитным переключением линейных сегментов
BP-OA, Booster Pre-Amplifier – оптический предусилитель
BT, Begin Tag – поле начала

C-n, Container-n – контейнер порядка $n = 1, 2, 3, 4$
CAD, Cell Assembly/ Reassembly Delay - отклонение во времени при разборке/сборке ячеек
CBR, Constant Bit Rate – постоянная битовая скорость
CCAT, Contiguous Concatenation – последовательная сцепка
CDC (S,G) ROADM, Colorless, Directionless and Contentionless (Spectrumless или Gridless) Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer - перестраиваемые оптические мультиплексоры ввода/вывода, прозрачные для любых волн рабочего диапазона 1530-1625 нм, независимые от направления и информационной нагрузки, спектра и сетки волн

CCI, Connection Control Interface – интерфейс управления соединением
 CETP, Carrier Ethernet Transport Platform – транспортная платформа Ethernet с оптическими интерфейсами
 cHEC, core HEC – основной контроль ошибок заголовка кадра
 CLP, Cell Loss Priority – приоритет потери ячейки
 CM, Connection Monitoring – наблюдение соединения
 CMEP, Connection Monitoring End Point – конечная точка контроля (наблюдения) соединения
 CMI, Complemented Mark Inversion – инверсия групп символов
 CMIP, Common Management Information Protocol – протокол общей управляющей информации
 CMISE, Common Management Information Services Element – сервисный элемент общей управляющей информации
 CMON, Connection Monitoring Overhead – заголовок слежения за соединением
 COMMSOH, Communications channel Overhead – заголовок канала связи
 CORBA, Common Object Request Broker Architecture – общая архитектура брокера объектных запросов
 CoS/SLAs, Class of Service/Service-Level-Agreement – класс сервиса/ соглашение о (гарантированном) уровне обслуживания
 CRC, Cyclic Redundancy Check – циклический избыточный код.
 CS, Convergence Sublayer – подуровень конвергенции или слияния
 CS-RZ, Carrier-Suppressed Return to Zero – кодирование с возвращением к нулю и подавлением несущей
 CSF, Client Signal Fail – повреждение сигнала пользователя
 CSMA/CD, Carrier Sense Multiply – Access/Collision Detection – множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий/столкновений
 C-Tag, Customer Tag – метка пользователя сети Ethernet
 CTD, Cell Transfer Delay - задержка передачи ячейки
 CTRL, Control word sent from source to sink – контрольное слово, передаваемое от источника к приемнику
 CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing – разреженное мультиплексирование с разделением по длине волны

DA, Destination Address – адрес назначения
 DAPI, Destination Access Point Identifier – идентификатор точки доступа адресата
 DC, Dispersion Compensated – компенсация дисперсии
 DCC, Data Communication Channel – канал передачи данных
 DCCm, Data Communication Channel multiplex – канал передачи данных для секции мультиплексирования SDH
 DCCr, Data Communication Channel regeneration – канал передачи данных для секции регенерации SDH
 DCF, Dispersion Compensate Fiber – волокно, компенсирующее дисперсию
 DCN, Data Communication Network – сеть передачи данных
 DCS-RZ, Duobinary-Carrier-Suppressed Return-to-Zero (coding format) – дуобинарный формат линейного кода с возвращением к нулю для внешней модуляции с подавлением оптической несущей частоты
 DEG, Degraded – ухудшение
 DL, Data Link – линия данных
 DeMUX, DeMultiplex – демультиплексирование
 DFB, Distributed Feedback – распределённая обратная связь
 DMod, Demodulation – демодуляция
 DNU, Do Not Use – не использовать (не применять)

DOCSIS, Data over Cable Service Interface Specification – спецификация интерфейсов услуг передачи данных в кабельной сети

DPQ-PSK, Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying - квадратурная фазовая манипуляция с двойной поляризацией

DPT, Dynamic Packet Transport – динамический транспорт пакетов

DPSK, Differential Phase-Shift Keying – дифференциальнофазовая импульсная модуляция

DQDB, Distributed Queue Double Bus – распределённая двойная шина с очередями

DQPSK, Differential Quadrature Phase Shift Keying – дифференциальнофазовая квадратурная импульсная модуляция

DSF, Dispersion-Shifted Fiber – волокно со смещенной дисперсией

DXC, Digital xCross Connect – цифровая кроссовая коммутация

DVB ANSI, Digital Video Broadcast – цифровое широкополосное видео (стандарт США)

DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны

E1, цифровой поток данных на скорости 2048кбит/с с циклом 125мкс, стандарт PDH

E2, цифровой поток данных на скорости 8448кбит/с с циклом 100мкс, стандарт PDH

E3, цифровой поток данных на скорости 34368кбит/с с циклом 47мкс, стандарт PDH

E4, цифровой поток данных на скорости 139264кбит/с с циклом 21мкс, стандарт PDH

E-APS, Ethernet APS – автоматическая защитная коммутация в сети Ethernet

ECC, Embedded Control Channel - встроенный канал управления

EDFA, Erbium Doper Fiber Amplifier – легированный эрбием оптический усилитель

EEC, Ethernet Equipment Slave Clock – синхронизация оборудования Ethernet

EEPROM, Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – электрически стираемая программируемая память

EFCl, Explicit Forward Congestion Indication – индикация упреждения явной перегрузки

EF, Extended Frame – устанавливаемый формата кадра

ELH, Extended Long Haul – сверх протяженная линия

EM, Error Monitoring – наблюдение ошибок

EML, Element Manager Layer – уровень управления элементом сети

EN, Edge Nodes – узлы на границе сети

E-NNI, External-Network-Network Interface – внешний межсетевой интерфейс («сеть-сеть»)

EoA, Ethernet-over-ATM – Ethernet через ATM

EoM, Ethernet-over-MPLS – Ethernet через MPLS

EoP, Ethernet-over-PDH – Ethernet через PDH

EoR, Ethernet-over-RPR – Ethernet через RPR

EoS, Ethernet-over-SDH – Ethernet через SDH

EoT, Ethernet-over-Transport – интерфейс транспортной сети Ethernet

EPD, Early Packet Discard - ранний сброс пакетов

EPRCA, Enhanced PRCA – улучшенный PRCA

EPROM, Erasable Programmable Read-Only Memory – стираемая программируемая память

ESCON, Enterprise Systems Connection – соединение учреждений систем

ESL, Extended Signal Label – установка сигнальной метки

ESpl, Electrical Splitter – электрический сплиттер

ESw, Electrical Switch – электрический коммутатор

ET, End Tag – конечная метка

Ethernet – технология пакетной передачи данных

ETHP, Ethernet end-to-end Path – мониторинг тракта Ethernet из конца в конец

ETHS, Segment monitoring – сегментный мониторинг тракта Ethernet

ETSI, European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартизации телекоммуникаций

ETHP, Ethernet end-to-end path – тракт Ethernet из конца в конец

ETHS, Ethernet Segment monitoring- тракт Ethernet с сегментным мониторингом

EXI, Extension Header Identifier - идентификатор расширения заголовка

FA, Frame Alignment – выравнивание кадра (иногда цикла)

FAS, Frame Alignment Signal – сигнал выравнивания цикла или кадра (синхросигнал, указывающий на начало цикла или кадра)

FCS, Frame Check Sequence – поле контрольной суммы кадра

FDDI, Fiber Distributed Data Interface – волоконный распределённый интерфейс данных

FEC, Forward Error Correction – коррекция ошибок вперед (по ходу передачи) или упреждающая коррекция ошибок

FECN, Forward Explicit Congestion Notification – уведомление о перегрузке в прямом направлении

FI, Flooding Indication – индикация занятия (кольца RPR)

FICON, Fiber CONnection – волоконное соединение для передачи данных

FMF, Few mode Fiber – волокно с малым числом мод

FSC, Fiber-Switch Capable – возможность коммутации волоконных световодов

FSP, Fiber Service Platform – волоконная сервисная платформа

FTTx, Fiber to the x – волокно до (места X)

GARP, Generic Attribute Registration Protocol - протокол используемый для регистрации некоторых абстрактных свойств в рамках сети

GbE, гигабитный Ethernet

GFP, Generic Framing Procedure – общая процедура формирования кадра

GFP-F, Frame mapped – общая процедура формирования кадра с размещением кадров (данных)

GFP-T, Transparented – общая процедура формирования кадра прозрачно (для данных)

GFR, Guaranteed Frame Rate – гарантированная скорость передачи кадров

GID, Group Identification – идентификация группы

GMPLS, Generalized Multi Protocol Label Switching – общая многопротокольная коммутация по меткам

GOP, Group of Pictures – группа изображений

GoS, Grade of Service – категория обслуживания

GPS, Global Position System – глобальная система позиционирования

HDB-3, High Density Bipolar of Order 3 – трёхуровневый биполярный код с высокой плотностью

HDLC, High-Level Data Link Control – высокоуровневый протокол управления на уровне звена передачи данных

HDSL, High bit rate Digital Subscriber Line – высокоскоростная цифровая абонентская линия

HDTV – High Digital Television - телевидение высокой четкости

HOV-C, Higher Order Virtual Container – виртуальный контейнер верхнего уровня

HP, High Path – тракт высокого порядка (уровня)

IaDI, Intra-Domain Interface – внутримежсетевой интерфейс

IDU, Interface Data Unit – интерфейсный блок данных

IrDI, Inter-Domain Interface – интерфейс между областями (доменами)

IEC, International Electrotechnical Commission – Международная Электротехническая комиссия

IEC, Incoming Error Count – подсчет поступающих ошибок

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers – институт по электротехнике и электронике

IETF, Internet Engineering Task Force - инженерный совет интернета

I-NNI, Internal Network-Network Interface –внутренний интерфейс сеть-сеть

IP, Internet Protocol – протокол межсетевой

IP-TV, Internet Protocol Television- телевидение средствами IP
 IPX, Internet Packet eXchange – межсетевой обмен пакетами
 IrDI, Inter Domain Interface – интерфейс между доменами
 iSCSI, internet Small Computer System Interface – межсетевой малый интерфейс компьютерной системы
 ISDN, Integrated Services Digital Network – цифровая сеть с интеграцией услуг
 ISO, International Organization for Standartization – Международная организация по стандартизации
 ITU-T, International Telecommunications Union – Telecommunications services sector – Сектор Телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т)
 LAPS, Link Access Procedure SDH – процедура доступа к линии SDH
 LAPD, Link-Access Procedure D – процедура доступа к каналу D
 LAN, Local Area Network – локальная компьютерная сеть
 LCAS, Link Capacity Adjustment Scheme – схема регулировки емкости канала
 LH, Long Haul – протяженная линия
 LI, Length Indicator – индикатор длины
 LLC, Logical Link Control – управление логическим каналом
 LLID, Logical Link Identifier – логический идентификатор линии
 LOF, Loss of Frame – потеря фрейма/кадра
 LOM, Loss of Multiframe – потеря сверхцикла/мультифрейма
 LOP, Loss of Pointer – потеря указателя
 LOS, Loss of Signal – потеря сигнала
 LOV-C, Lower Order Virtual Container – виртуальный контейнер низшего уровня
 LOV Con, Low Order Virtual Concatenation – виртуальная сцепка нижнего уровня
 LP, Low Path – тракт нижнего уровня
 LPC, Linear Predictive Coding – кодирование с линейным предсказанием
 LSP, Label Switched Path – коммутируемый по меткам тракт передачи
 LSR, Label-Switch Router – маршрутизатор с коммутацией по меткам
 L/T, Length/Type – длина или тип
 λ SC или LSC, Lambda Switch Capable – возможность коммутации волн (оптических каналов)
 MA, Maintenance and Adaptation – обслуживание и адаптация
 MAC, Media Access Control – управление доступом в среде
 MCF, Multicore Fiber – многосердцевинное волокно
 MAN, Metropolis Area Network – городская сеть (сеть МЕТРО)
 MF, Mediation Function – функции медиатора (промежуточного устройства)
 MFAS, Multiframe Alignment Signal – сигнал выравнивания (синхронизация) мультифрейма (сверхцикла)
 MFI, MultiFrame Indicator – индикатор сверхцикла
 MHL, Multi Haul Long – мультиплексирование в протяженную линию
 MIB, Management Information Base – база данных управляющей информации
 MIMO, Multiple Input and Multiple Output – множественный ввод и множественный вывод
 MLT-3, Multi Level Transmission – 3 – многоуровневая передача с тремя уровнями
 MoE – T-MPLS over Ethernet - T-MPLS через сеть Ethernet
 MoO – T-MPLS over OTH - T-MPLS через сеть OTH
 MoP – T-MPLS over PDH - T-MPLS через сеть PDH
 MoR – T-MPLS over RPR - T-MPLS через сеть RPR
 MoS – T-MPLS over SDH - T-MPLS через сеть SDH
 MP3, MPEG Audio Layer 3 – сжатие данных аудио уровень 3
 MPCP, Multi-Point control Protocol – протокол управления множеством узлов
 MPEG, Motion Pictures Experts Group - группа экспертов по движущимся изображениям
 MPHL, Main Profile at High Level - основной профиль на высоком уровне
 MPLS, Multi-Protocol Label Switching – многопротокольная коммутация по меткам

MPLS, Multiprotocol Lambda Switching – многопротокольная коммутация оптической волны
 MPI-R, Main Path Interfaces –R, интерфейс основного тракта на приёме
 MPI-S, Main Path Interfaces – S, интерфейс основного тракта на передаче
 MS, Multiplex Section – секция мультиплексирования
 MSC, Multiservice Concentrator – мультисервисный концентратор
 MSI, Member Status – статус участника
 MSOH, Multiplex Section Overhead – заголовок секции мультиплексирования
 MSP, Multiplex Section Protection - защита секции мультиплексирования
 MSP, Multiservice Platform – мультисервисная платформа
 MSPP, Multi-Service Provisioning Platform – мультисервисная платформа для предоставления услуг пакетной передачи IP
 MS-REI, Multiplex Section Remote Error Indication – индикация ошибки удаленной стороны секции мультиплексирования
 MSSP, Multi-Service Switching Platform – мультисервисная коммутационная платформа
 MS-SPRing, Multiplex Section Shared Protected Rings – защита секции мультиплексирования в кольцевой сети
 MST, Multiplex Section Termination – окончание секции мультиплексирования
 MSTP, Multi-Service Transport Platform – мультисервисная транспортная платформа
 MUX, Multiplex - мультиплексирование
 NE, Network Element – сетевой элемент
 NEF, Network Element Function – функции сетевого элемента
 NGN, Next Generation Networks – сети нового поколения
 N-ISDN, Narrowband Integrated Services Digital Network – узкополосная цифровая сеть с интеграцией служб (У-ЦСИС)
 NM, Network Management – управление сетью
 NMI, Network Management Interface – интерфейс сетевого управления
 NML, Network Management Layer – уровень управления сетью
 NMS, Network Management Systems- система управления сетью
 NNI, Network-Network Interface – интерфейс между сетями
 NNI, Network Node Interface – интерфейс узла сети
 NPI, Null Pointer Indication – индикация нулевого указателя
 NR, Network Operator – оператор сети
 nrt, non real time – нереальное время
 NRZ, Non Return to Zero – кодирование без возвращения к нулю
 NSAP, Network Service Access Point – точка доступа сетевого сервиса
 NZDSF, Nonzero dispersion-shifted fiber – волокно со смещенной ненулевой дисперсией
 OA, Optical Amplifier – оптический усилитель
 OADM, Optical Add/Drop Multiplex – оптический мультиплексор ввода/вывода
 OAM, Operation, Administration, Maintenance – эксплуатация, управление администрирование и техническое обслуживание
 OCC, Optical Channel Carrier – несущая оптического канала
 OCDM, Optical Code Division Multiplexing – оптическое мультиплексирование с кодовым разделением
 OCh, Optical Channel with full functionality – оптический канал с полной функциональностью
 OCG-n, Optical Carrier Group of order n- группирования оптических несущих частот порядка n
 OCI, Open Connection Indication – индикация открытого соединения
 OCXO – Oven-Controlled Crystal Oscillator – термостатированный кварцевый генератор
 ODI, Outgoing Defect Indication – индикация дефекта на выходе
 ODMX, Optical DeMultiplex – оптический демультиплексор
 ODUk, Optical Channel Data Unit k – блок данных оптического канала порядка k
 ODUk-TCM – ODUk Tandem Connection Monitoring – блок данных оптического канала, поддерживающий наблюдение (мониторинг) парных (тандемных) соединений

ODUk-Xv, X virtually concatenated ODUks – виртуальная сцепка *X*-блоков
 OEI, Outgoing Error Indication – индикация блоковых ошибок по выходу
 OH, Overhead – заголовок
 OME, Optical Multiservice Edge – оптический мультисервисный узел
 OMP, Optical Metro Platform – оптическая платформа уровня крупного города
 OMS, Optical Multiservice - оптический мультисервис
 OMS, Optical Multiplex Section – секция оптического мультиплексирования
 OMS-OH, Optical Multiplex Section Overhead – заголовок секции оптического мультиплексирования
 OMU, Optical Multiplex Unit – блок оптического мультиплексирования
 OMX, Optical Multiplex – оптический мультиплексор
 ONMI, Optical Network Node Interface – интерфейс узла оптической сети
 OPS, Optical Physical Section – оптическая физическая секция
 OPuk, Optical Channel Payload Unit *k* – блок полезной нагрузки оптического канала порядка *k*
 OPuk-Xv, X virtually concatenated ODUks – виртуальная конкатенация *X*-блоков ODUks
 OSC, Optical Supervisory Channel – контролирующий оптический канал
 OSI, Open System Interconnection – взаимодействие открытых систем
 OSM, Optical Services Multiplexer – оптический мультиплексор услуг
 OSNR, Optical Signal Noise Ratio – отношение оптический сигнал/шум
 OSP, Optical Switching Platform – оптическая коммутационная платформа
 OSS, Operations Support System – операционная система
 OTDM, Optical Time Division Multiplexing – оптическое мультиплексирование с временным разделением
 OTH, Optical Transport Hierarchy – оптическая транспортная иерархия
 OTM, Optical Transport Module – оптический транспортный модуль
 OTN, Optical Transport Network – оптическая транспортная сеть
 OTS, Optical Transmission Section – оптическая транспортная секция
 OTS, Optical Transport System – оптическая транспортная система
 OTS-OH, OTS-Overhead – заголовок оптической транспортной секции
 OTUk, Optical Transport Unit *k* - оптический транспортный блок порядка *k*
 OXC, Optical xCross Connect – оптическая кроссовая коммутация
 PAD, Padding – поле заполнения недостающего пространства кадра
 PAM, Pulse Amplitude Modulation – импульсная модуляция амплитуды
 PBB, Provider Backbone Bridging - мост магистралей провайдера
 PBT, Provider Backbone Transport – транспортная магистраль провайдера
 PCC, Protection Communication Channel – канал защиты соединения
 PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy – плезиохронная цифровая иерархия
 PDL, Polarization-Dependent Loss – поляризационно-зависимые потери
 PDU, Packet Data Unit – блок пакетных данных
 PDU, Protocol Data Unit – протокольный блок данных
 PLD, Payload – нагрузка
 PLM, Payload Mismatch – несоответствие полезной нагрузки
 PM, Path Monitoring – наблюдение тракта
 PMD, Polarization Mode Dispersion – поляризационная модовая дисперсия
 PMI, Payload Missing Indication – индикация пропадания нагрузки
 PMOH, Path Monitoring Overhead – заголовок наблюдения тракта
 ppm, part per million – миллионная доля
 PNNI, Private Network Node Interface – частный интерфейс сетевого узла
 PNNI, Private Network-to-Network Interface – интерфейс между частными сетями
 POH, Path Overhead – трактовый заголовок
 PON, Passive Optical Network – пассивная оптическая сеть
 POS, Packet over SDH – пакетная передача через сеть SDH

P-OT, Packet-Optical Transport – пакетная передача в оптической сети
 PPP, Point-to-Point Protocol – протокол «точка-точка»
 PRBS, Pseudo Random Binary Sequence – псевдослучайная бинарная последовательность
 PRC, Primary Reference Clocs – первичный эталонный (тактовый) генератор
 PT, Payload Type – тип нагрузки
 PTI, Payload Type Identificates – идентификатор типа полезной нагрузки
 PTR, Pointer - указатель
 PVC, Permanent Virtual Circuit – постоянный виртуальный канал
 QAF, Q-Adapter Function – функции Q-адаптера;
 QoS, Quality of Service – качество обслуживания (сервиса)
 2R, Re-amplification, Re – shaping – усиление и восстановление формы
 3R, Re-amplification, Re – shaping, Re-timing – усиление, восстановление формы и устранение фазовых дрожаний
 R-APS , Ring APS – автоматическое защитное переключение в кольце
 RCD, Receive Clock Deviation – отклонение полученного синхросигнала (от нормы)
 RD, Residual Dispersion – остаточная дисперсия
 RDI, Remote Detect Indication – индикация дефекта на удаленном конце
 REI, Remote Error Indication – индикация ошибки на удаленном конце
 RFC, Request For Comments – запрос для комментариев
 RFI, Remote Failure Indication – индикация неисправности удаленном конце
 RI, Ring Identifier – идентификатор кольца
 ROADM, Reconfigure OADM – перестраиваемый OADM
 ROSE, Remote Operation Services Element – элемент обслуживания удаленных операций
 RPR, Resilient Packet Ring – защищаемое пакетное кольцо или пакетное кольцо с самовосстановлением (в разных литературных источниках)
 RS, Rees-Solomon – Рид-Соломон
 RSOH, Regeneration SOH- заголовок секции регенерации
 RSP, Routing Switch Platform – платформа с коммутацией и маршрутизацией
 RST, Regenerator Section Termination – окончание секции регенерации
 RSVP-TE, Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering - протокол резервирования ресурсов – проектирование трафика
 rt, real time, реальное время
 RZ, Return to Zero – возвращение к нулю
 SA, Source Address – адрес источника
 SANs, Storage Area Networks – сети хранения данных (серверы услуг, базы данных)
 SAPI, Source Access Point Identifier – идентификатор источника (передатчика) точки доступа
 SAPI, Service Access Point Identifier – идентификатор точки доступа к сервису
 SAR, Segmentation and Reassembly Sublayer – подуровень сегментации и сборки
 SAR-PDU, Segmentation and Reassembly Sublayer – Protocol Data Unit – протокольный блок данных для подуровня сегментации и сборки
 SASE, Stand Alone Synchronization Equipment – отдельное оборудование синхронизации
 SC, Service Class – класс обслуживания
 SCR, Sustainable Cell Rate – поддерживаемая скорость ячеек
 SDH, Synchronous Digital Hierarchy – синхронная цифровая иерархия
 SDM, Space Division Multiplexing – мультиплексирование с пространственным разделением
 SDXC, Synchronous Digital Cross-Connect – синхронный цифровой кроссовый коммутатор
 SE CBR, Severely Errored Cell Block Ratio - отношение блоков ячеек с серьезными ошибками к общему числу блоков ячеек ATM
 SEC, SDH equipment slave clocks –тактирование оборудования SDH
 SETS, SDH Equipment Timing Source – источник тактов синхронной аппаратуры
 SFD, Start-of-Frame-Delimiter – начальный ограничитель кадра
 SL, Signal Label – метка сигнала

SLA, Service Level Agreement – соглашение о гарантированном уровне обслуживания

SM, Section Monitoring – наблюдение секции

SMF, Single Mode Fiber – одномодовое волокно

SML, Service Management Layer – уровень управления услугами

SMOH, заголовок секции наблюдения

SMX, Synchronous Multiplexer – синхронный мультиплексор

SN, Segment Number – порядковый номер

SNAP, Sub-Network Access Protocol – протокол доступа в подсеть

SNC, Sub-Network Connection – соединение подсети

SNC/P, Sub-Network Connection Protection – резервирование/защита соединения подсети

SNC/I, Inherently monitored Sub-Network Connection protection – резервирование/защита на уровне соединения подсетей с внутренним мониторингом

SNC/N, Non-intrusively Monitored Sub-Network Connection protection – резервирование/защита на уровне соединения подсетей без внутреннего мониторинга

SNC/S, Sublayer (tandem connection) monitored Sub-Network Connection protection – резервирование/защита на уровне соединения подсетей с внутренним мониторингом тандемного соединения

SNMP, Simple Network Management Protocol – простой протокол управления сетью

So, Source – источник (передатчик)

SOH, Section Overhead – секционный заголовок

SOHO, Small Office-Home Office – малое предприятие

SONET, Synchronous Optical Network – синхронная оптическая сеть

SPI, SDH Physical Interface – физический интерфейс SDH

SRC, Second Reference Clocks – вторичный тактовый генератор

SRTS, Synchronous Residual Time Stamps – синхронная остаточная метка времени (расхождения во времени)

SSF, Server Signal Failure – пропадание/ошибка сигнала сервера

S-Tag, Service provider Tag – метка провайдера сети Ethernet

ST, Segment Type – тип сегмента

STAT, Status – состояние

STM-N, Synchronous Transport Module – синхронный транспортный модуль порядка $N = 0, 1, 4, 16, 64, 256$

STP, Spanning Tree Protocol – протокол «охвата деревьев»

STP, Shielded Twisted-Pair – экранированная витая пара

SVC, Switched Virtual Circuit – коммутируемый виртуальный канал

TC, Tandem Connection – тандемное соединение

TC-API, Tandem Connection Access Point Identifier – идентификатор точки доступа тандемного соединения

TCM, Tandem Connection Monitoring – наблюдение (мониторинг) тандемного соединения

TCMOH – заголовок наблюдения парного соединения

TCP/IP, Transmission Control Protocol/Internet Protocol – протокол управления передачей данных/ межсетевой протокол

TC-RDI, Tandem Connection RDI индикация дефекта на удаленном конце тандемного соединения

TC-REI, Tandem Connection REI – индикация блоков ошибок на удаленном конце тандемного соединения

TCXO, Temperature Compensated Crystal Oscillator – кварцевый генератор с температурной компенсацией

TDM, Time-Division Multiplex – мультиплексирование с разделением во времени

tHEC, type HEC – тип HEC

TIM, Trace Identifier Mismatch – несоответствие идентификатора маршрута

TM, Terminal Multiplex – терминальный (оконечный) мультиплексор

TMN, Telecommunications Management Network – сеть управления телекоммуникациями (электросвязью)

TP-MPLS, Transport Profile MultiProtocol Label Switching – транспортная многопротокольная коммутация по меткам

T-MPLSP, Transport MultiProtocol Label Switching end-to-end path supervision - транспортная многопротокольная коммутация по меткам с контролем тракта из конца в конец

T-MPLST, Transport MultiProtocol Label Switching tandem connection monitoring - транспортная многопротокольная коммутация по меткам с мониторингом tandemного соединения

TP, Termination Point – точка терминирования (окончания)

TPD, Tail Packet Discard - сброс остатков пакета или обозначает в сети OTN транспондер

TR, Trail Trace - метка тракта

TS, Tributary Slot – компонентный слот

T-SDN, Transport Software Defined Network – программно-конфигурируемая транспортная сеть

TSF, Trail Signal Fail – сигнал повреждения тракта

TSS, Transport Service Switch – транспортный сервисный коммутатор

TTI, Trail Trace Identifier – идентификатор маршрута тракта

TTL, Time to Live – время жизни

TU-n, Tributary Unit – компонентный блок уровня n

TUG-n, Tributary Unit Group n – групповой компонентный блок уровня n

TVoIP, Television over IP – телевидение через IP

TxTI, Transmitted Trace Identifier – переданный идентификатор тракта

UDP, User Datagram Protocol – дейтаграммный протокол пользователя

UI, Unit Interval – единичный интервал

UNI, User-to-Network Interface – интерфейс пользователь-сеть

UPI, User Payload Identifier - идентификатор пользовательской нагрузки

UTP, Unshielded Twisted-Pair – неэкранированная витая пара

UU, User-to-User - пользователь пользователю

VCAT, Virtual Concatenation – виртуальная сцепка (конкатенация)

VC-n, Virtual Container – виртуальный контейнер порядка $n = 1, 2, 3, 4$,

VCG, Virtual Concatenation Group – группа виртуальной конкатенации

VCI, Virtual Circuit Identifier – идентификатор виртуального канала

VCOH, Virtual Concatenation Overhead – заголовок виртуальной конкатенации

VCPT, Virtual Concatenated Payload Type – тип нагрузки виртуальной конкатенации (сцепки)

VDSL or VHDSL, Very High Speed [DSL](#) – очень высокоскоростная цифровая абон. линия

VOA, Variable Optical Attenuator – регулируемый оптический аттенюатор

VoD, Video-on-Demand – видео по запросу

VPI, Virtual Path Identifier – идентификатор виртуального пути

VPN, Virtual Private Network – виртуальная частная сеть

VSR, Very Short Reach – очень короткая линия

WAN, Wide Area Network – территориальная распределённая сеть

WDM, Wavelength Division Multiplexing – мультиплексир. с разделением по длине волны

WE, Wrap Eligible – возможность упаковки

WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access – международное взаимодействие для микроволнового доступа

WS, Work Station – рабочая станция

WSF, Work Station Function – функции рабочей станции сети управления

WSS, Wavelength Selective Switch – селективный волновой коммутатор

WWSAN, World Wide Storage Area Network - всемирная сеть хранения данных

Список литературы

1. Фокин В.Г. Проектирование оптической мультисервисной транспортной сети. Учебное пособие. Новосибирск, СибГУТИ, 2009.-205с.
2. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. –М.: Эко-Трендз, 2008.- 288с.
3. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети: Учебное пособие.-СПб.: Издательство «Лань», 2016. - 440 с.
4. Фокин В.Г., Ибрагимов Р.З. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи. Учебное пособие для вузов.- М.: Горячая линия Телеком, 2017.-180с.
5. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением. Учебное пособие. – Новосибирск, СибГУТИ, 2005. -136с.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи.–М.: ЛЕСАР арт, 2003. -288с.
7. Слепов Н.Н. Англо-русский толковый словарь сокращений в области связи, компьютерных и информационных технологий. – М.: Радио и связь, 2005.-800с.
8. ГОСТ 21.406-88. Обозначение устройств СЦИ.
9. Основы проектирования кабельных систем центров обработки данных. Требования к телекоммуникационной кабельной инфраструктуре для классов 1-4 по EN-50600-2-4. Информационный документ. COMMSCOPE. 2016. -16с. https://comptek.ru/materials/commscope/systimax/Основы_дизайна_СКС_ЦОД.pdf (Обращение 1.03.18).
10. Технические рекомендации по применению оптических волокон фирмы Fujikura на волоконно-оптических сетях Российской Федерации. ОАО СКТБ-ТОМАСС. 2007.-39с.
11. Бакланов И.Г. SDH-NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей.-М.: Метротек, 2006.-736с.
12. Ершов В.А., Кузнецов Н.А. Мультисервисные телекоммуникационные сети.–М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.-432с.
13. Синепол В.С., Цикин И.А. Системы компьютерной видеоконференцсвязи.- М.: ООО «Мобильные коммуникации», 1999. -166с.
14. Шмалько А.В. Цифровые сети связи. Основы планирования и построения.– М.: Эко-Трендз, 2001.-282с.
15. Фокин В.Г. Оптические мультиплексоры OADM/ROADM и коммутаторы РХС в мультисервисной транспортной сети. Учебное пособие УМО. – Новосибирск, СибГУТИ, 2011.–204с.
16. Безопасность в электросвязи и информационных технологиях. Обзор содержания и применения действующих Рекомендаций МСЭ-Т для обеспечения защищенной электросвязи. – ITU, 2006.-130с.
17. Щербо В.К. Стандарты вычислительных сетей. Справочник. -М.: Кудиц-Образ, 2000.-272с.

18. Телекоммуникационные системы и сети. Том 3. Мультисервисные сети./Величко В.В, Субботин Е.А., Шувалов В.П., Ярославцев А.Ф./ Учебное пособие УМО.-М.: Горячая линия - Телеком, 2005.-592с.
19. Шувалов В.П., Фокин В.Г. Оптические сети доступа большого радиуса действия. – М.: Горячая линия - Телеком, 2018.-180с.
20. Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Стандарт организации. Дата введения: 21.05.2014. -250с. http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/STO-56947007-33.180.10.172-2014.pdf. Обращение 20.03.2018.
21. Инструкция по паспортизации и эксплуатации ВОЛП с использованием аппаратуры спектрального уплотнения и синхронной цифровой иерархии. – М.: ЦНИИС - РОСТЕЛЕКОМ, 2007.-175с.
22. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. – М.: Эко-Трендз, 2003.-272с.
23. Давыдкин П.Н., Колтунов М.Н., Рыжков А.В. Тактовая сетевая синхронизация. – М.: Эко-Трендз, 2004.-205с.
24. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.
25. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable.
26. Рекомендация МСЭ-Т G.654. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля со смещенной дисперсией и отсечкой.
27. Рекомендация МСЭ-Т G.655. Characteristics of a non-zero dispersion- shifted single-mode optical fibre and cable.
28. Рекомендация МСЭ-Т G.656. Характеристики волокна и кабеля с ненулевой дисперсией для широкополосной оптической передачи.
29. Рекомендация МСЭ-Т G.657. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на макроизгибе, для использования в сетях доступа.
30. ITU-T Recommendation G.663. Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems.
31. Рекомендация МСЭ-Т G.665. Типовые характеристики Рамановских усилителей и Рамановских усилительных подсистем.
32. Рекомендация МСЭ-Т G.666. Характеристики компенсаторов ПМД и приемники с компенсацией ПМД.
33. Рекомендация МСЭ-Т G.691. Оптические интерфейсы для одноканальных STM-64 и других систем СЦИ с оптическими усилителями.
34. ITU-T Recommendation G.692. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers.
35. Рекомендация МСЭ-Т G.693. Оптические интерфейсы для внутристанционных систем.

36. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
37. Рекомендация МСЭ-Т G.694.2. Спектральные сетки для применения технологий WDM: сетка длин волн технологии CWDM.
38. Рекомендация МСЭ-Т G.695. Оптические интерфейсы для приложений, использующих грубое мультиплексирование с разделением по длине волны.
39. Рекомендация МСЭ-Т G.696.1. Внутридоменные приложения плотного волнового уплотнения (DWDM), совместимые в продольном направлении.
40. ITU-T Recommendation G.697. Optical monitoring for DWDM systems.
41. Рекомендация МСЭ-Т G.698.1. Многоканальные приложения DWDM с одноканальными оптическими интерфейсами.
42. ITU-T Recommendation G.698.2. Amplified multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces.
43. ITU-T Recommendation G.703. Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces.
44. ITU-T Recommendation G.707. Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).
45. ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 (2003), Interfaces for the optical transport network (OTN).
46. ITU-T Recommendation G.783. Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks.
47. ITU-T Recommendation G.784. Synchronous digital hierarchy (SDH) management.
48. ITU-T Recommendation G.798 (2002), Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks.
49. ITU-T Recommendation G.803. Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH).
50. ITU-T Recommendation G.805. Generic functional architecture of transport networks.
51. ITU-T Recommendation G.810. Definitions and terminology for synchronization networks.
52. ITU-T Recommendation G.811. Timing characteristics of primary reference clocks.
53. ITU-T Recommendation G.812. Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks.
54. ITU-T Recommendation G.813. Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC).
55. ITU-T Recommendation G.832 (1998), Transport of SDH elements on PDH networks – Frame and multiplexing structures, plus Amendment 1 (2004), Payload type code for virtual concatenation of 34 368 kbit/s signals.
56. ITU-T Recommendation G.841. Types and characteristics of SDH network protection architectures.
57. ITU-T Recommendation G.842. Interworking of SDH network protection architectures.

58. ITU-T Recommendation G.872. Architecture of optical transport networks.
59. ITU-T Recommendation G.873.1. Optical Transport Network (OTN): Linear protection.
60. ITU-T Recommendation G.874. Management aspects of the optical transport network element.
61. ITU-T Recommendation G.955. Digital line systems based on the 1544 kbit/s and the 2048 kbit/s hierarchy on optical fibre cables.
62. Рекомендация МСЭ-Т G.957. Оптические интерфейсы для оборудования и систем, относящихся к синхронной цифровой иерархии.
63. ITU-T Recommendation G.958. Digital line systems based on the synchronous digital hierarchy for use on optical fibre cables.
64. Рекомендация МСЭ-Т G.959.1. Интерфейсы физического уровня оптической транспортной сети.
65. Рекомендация МСЭ-Т G.7041. Общая процедура формирования кадров (GFP).
66. ITU-T Recommendation G.7042. Link capacity adjustment scheme (LCAS) for virtual concatenated signals.
67. ITU-T Recommendation G.8010. Architecture of Ethernet layer networks.
68. ITU-T Recommendation G.8011. Ethernet Services Framework.
69. ITU-T Recommendation G.8012. Ethernet UNI and Ethernet NNI.
70. ITU-T Recommendation G.8021. Characteristics of Ethernet transport network equipment functional blocks.
71. ITU-T Recommendation G.8031. Ethernet Protection Switching.
72. ITU-T Recommendation G.8051 Management aspects of the Ethernet-over-Transport (EoT) capable network element .
73. ITU-T Recommendation G.8251. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN).
74. ITU-T Recommendation G.8261. Timing and synchronization aspects in packet networks
75. ITU-T Recommendation G.8262. Timing characteristics of synchronous ethernet equipment slave clock (EEC).
76. G.8101 Terms and Definitions for Transport MPLS.
77. ITU-T Recommendation G.8110.1. Architecture of Transport MPLS (T-MPLS) layer network .
78. ITU-T Recommendation M.3010. Principles for a telecommunications management network.
79. ITU-T Recommendation X.86. Ethernet over LAPS.
80. G.Дополнение.39. Рассмотрение вопросов расчета и проектирования оптических систем.
81. Рекомендация МСЭ-Т I.326. Функциональная архитектура транспортных сетей, базирующихся на ATM.
82. ITU-T Recommendation I.432.2. B-ISDN user-network interface – Physical layer specification: 155 520 kbit/s and 622 080 kbit/s operation.
83. ITU-T Recommendation I.432.4. B-ISDN user-network interface – Physical layer

specification: 51 840 kbit/s operation.

84. ITU-T Recommendation I.432.5. B-ISDN user-network interface – Physical layer specification: 25 600 kbit/s operation.

85. ITU-T Recommendation I.610. B-ISDN operation and maintenance principles and functions.

86. ITU-T Recommendation I.630. ATM protection switching.

87. ITU-T Recommendation I.731. Types and general characteristics of ATM equipment.

89. ITU-T Recommendation I.732. Functional characteristics of ATM equipment

90. G.sup.43. Transport of IEEE 10G Base-R in Optical Transport Networks (OTN).

91. ITU-T Recommendation M.2130. Operational procedures for the maintenance of the transport network.

92. Рекомендация МСЭ-Т М.3060. Принципы управления сетями последующих поколений.

93. Руководство по технологиям объединенных сетей, 4-е издание.: Пер. с англ.-М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.-1040с.

94. CISCO TRANSPORT PLANNER DWDM OPERATIONS GUIDE, R10.6.1.

[HTTPS://WWW.CISCO.COM/C/EN/US/TD/DOCS/OPTICAL/METROPLANNER/METROPLANNER_10_61/OPERATIONS/GUIDE/454MP_OPSGUIDE/454MP_PREFACE.HTML](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/metroplanner/metroplanner_10_61/operations/guide/454mp_opsguide/454mp_preface.html) .

(ОБРАЩЕНИЕ 20.03.2018)

95. ITU-T Recomm. G.680. Physical transfer functions of optical network elements.

96. Yutaka Miyamoto, Akira Hirano, Shoichiro Kuwahara. Novel Modulation and Detection for Bandwidth-Reduced RZ Formats Using Duobinary-Mode Splitting in Wideband PSK/ASK Conversion// Journal of Lightwave Technology, №12, 2002. P.2067-2077.

97. Никульский И.Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа. – М.: Техносфера, 2006.-251с.

98. Коган С.С. IP- трансформация транспортных сетей. Фотонный уровень// Вестник связи, №3, 2009.-С.39-43.

99. Jörg Buesink. SURFnet7: PBB-TE and MPLS-TP technical description and comparison. <https://www.surf.nl/binaries/content/assets/surf/en/2014/report-surfnet7-pbb-te-and-mpls-tp.pdf>. (Обращение 21.03.18)

100. Ciena's 6500 Packet-Optical Platform. <https://www.walkerfirst.com/uploads/files/literature/Ciena%206500.pdf> (Обращение 21.03.18)

101. Эволюция экономики проектирования оптических сетей// Srinivasan Ramasubramanian университет Аризоны, Suresh Subramaniam, университет Джорджа Вашингтона Satyajeet S. Ahuja, Steven J. Hand, Serge Melle, Infinera Corp. 2011.-10с. https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2016/10/Infinera_EoOND.pdf . (Обращение 22.3.18)

102. Мендес Алексис/ Справочник по специализированным оптическим волокнам. М.: Техносфера, 2012.-727с.

103. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трешиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Проектирование высокоскоростных когерентных линий связи// Квантовая электроника, №12, 2016.-С.1121-1128.

Владимир Григорьевич Фокин

**Проектирование оптической мультисервисной
транспортной сети**

Учебное пособие

Редактор:

Корректор:
