

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

А.С. Перин, С.Н. Шарангович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию
для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи»

Томск 2018

УДК 537.8(075.8) + 621.371(075.8)

Рецензент:
проф. СВЧ и КР, д.ф.-м.н.

А.Е. Мандель

Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем.
Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» // А.С. Перин, С.Н. Шарангович / Под ред. А.С. Перина. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 110 с.

В учебно-методическом пособии приведены основные теоретические материалы по проектированию цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Рассмотрены общие принципы построения и выбора компонент многоволновых оптических сетей связи, дан расчет длин регенерационных и усилительных участков, показателей надежности, рассмотрены схемы организации связи, вопросы тестирования компонентов и оценки их характеристик. Представлены методические рекомендации и примеры решения рассмотренных вопросов.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения курсового проекта по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль "Оптические системы и сети связи", а также может быть полезным при выполнении бакалаврской работы.

© Перин А.С., Шарангович С.Н., 2018
© Томский гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2018.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Общие принципы построения современных оптических сетей связи	6
2 Оптические компоненты современных оптических сетей связи ...	11
2.1 Требование к компонентам оптических систем	11
2.2 Мультиплексоры и демупльтиплексоры.....	12
2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов.....	15
2.4 Оптические усилители.....	16
2.5 Передатчики.....	25
2.6 Фотоприемники.....	27
2.7 Оптическое волокно.....	28
3 Расчет длины регенерационного и усилительных участков	31
3.1 Определение необходимого качества передачи системы связи.....	31
3.2 Определение максимальной длины усилительного участка.....	33
3.3 Определение максимальной длины регенерационного участка.....	36
4 Схема организации связи	40
4.1 Составление схемы организации связи	40
4.2 Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ и типа оптического кабеля.....	41
4.3 Определение оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендаций МСЭ-Т.....	53
4.4 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети... ..	57
4.5 Построение ВОЛС	61
4.5.1 Проектирование прямого направления ВОЛС.....	61
4.5.2 Проектирование обратного направления ВОЛС	70
4.6. Определение помехозащищенности участка транспортной сети	78
5 Расчёт показателей надёжности	80
5.1 Общие положения.....	80
5.2 Основные показатели надёжности.....	82
5.3 Требования к показателям надёжности ВОЛС.....	83
5.4 Оценка надёжности участка первичной магистральной сети.....	85
5.4.1 Оценка надёжности работы линейно-кабельных сооружений.....	85
5.4.2 Оценка надёжности работы аппаратуры.....	87
5.4.3 Оценка работы надёжности участка сети с учётом линейных сооружений и аппаратуры.....	89

6 Тестирование компонентов и оценка характеристик	91
6.1 Общие положения.....	91
6.2 Оптические источники для тестирования.....	92
6.3 Приемники для тестирования.....	94
6.3.1 Измерители мощности излучения.....	94
6.3.2 Анализаторы оптического спектра.....	95
6.3.3 Измерители длины волны.....	97
6.4 Типовые конфигурации тестирования компонентов.....	98
6.4.1 Тестирование мультиплексоров и демультиплексоров.....	99
6.4.2 Тестирование оптических источников.....	102
6.4.3 Тестирование оптических приемников.....	103
Список литературы	105
Список основных сокращений и обозначений	107
Приложение А. Пример технического задания на курсовое проектирование	108

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» изучается студентами обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль "Оптические системы и сети связи" в 6, 7, 8 семестрах. В рамках лекционного курса осваивается теоретический материал по учебной литературе [1-5], приобретаются навыки практических расчетов, проводится лабораторный практикум и выполняется курсовой проект.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения занятий по курсовому проектированию. В пособии содержится необходимый теоретический материал, методические рекомендации и примеры выполнения курсового проекта.

Пособие состоит из девяти разделов. Первый и второй разделы посвящены описанию общих принципов построения и компонентам оптических цифровых телекоммуникационных систем (ОЦТС). В третьем разделе рассматриваются регенерационные и усилительные участки ОЦТС. В четвертом обосновывается выбор схемы организации связи. В пятом и шестом разделах приведены оценки надежности и рассмотрено тестирование компонент.

Список литературы включает источники [1-7], рекомендуемые для самостоятельного и более углубленного изучения вопросов, выносимых на практические занятия, а также нормативные документы [8-15].

При подготовке пособия использовались учебно-методические материалы по проектированию волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением, предоставленные доцентом каф. МЭС МТУСИ Шарафутдиновым Р.М., а также методики составления схем организации связи из [1].

1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

В настоящее время волоконно-оптические коммуникации используются в сетях практически всех масштабов: корпоративные сети, сети доступа, городские, региональные сети, междугородние линии связи, трансконтинентальные линии связи. И чем больше протяженность, и чем выше скорость передачи, тем более заметны преимущества технологии ВОЛС по сравнению с другими. Рост скорости передачи в протяженных линиях связи показывает, что нет ни какой альтернативы волокну. Мы наблюдаем соревнование одной волоконно-оптической технологии с новой более совершенной волоконно-оптической технологией. При строительстве протяженных ВОЛС волокно осталось один на один с самим собой.

Применение эрбиевых усилителей открыло новую эру ВОЛС. Стала возможной безрегенерационная передача на расстояния до 1000 км и более [7]. В настоящее время можно утверждать, что решения на основе EDFA проверены практикой, надежны, сравнительно недороги, достаточно эффективны и не имеют лучших альтернатив при строительстве протяженных ВОЛС с расстоянием между усилителями 60 - 120 км.

Системы с многомодовыми волокнами MMF долгое время составляли основу протяженных ВОЛС - градиентное многомодовое волокно (волокно G.651), светодиоды на основе арсенида галлия излучающие на длине волны 850 нм. Поскольку потери в волокне на этой длине волны были более чем существенны (3 дБ/км), такие линии связи строились с большим числом близко расположенных друг к другу регенераторов. Эти оптические магистрали были наземными, а для межконтинентальной связи все еще использовались подводные коаксиальные кабели.

С появлением одномодового волокна (которое сегодня называется стандартное одномодовое волокно, SSF или волокно G.652) становится ясно, что значительно перспективней вести передачу на длине волны 1300 нм - меньше потери и дисперсия. Использование одномодового волокна позволяет передавать

оптические сигналы с большей скоростью и на большие расстояния. Сначала сложно было реализовать на практике преимущество нового типа волокна. Но улучшение технологий сварки одномодового волокна, серийное производство лазеров на длине волны 1300 нм и развитие технологии производства одномодового волокна способствовали быстрому устареванию систем протяженных магистралей на основе многомодового волокна.

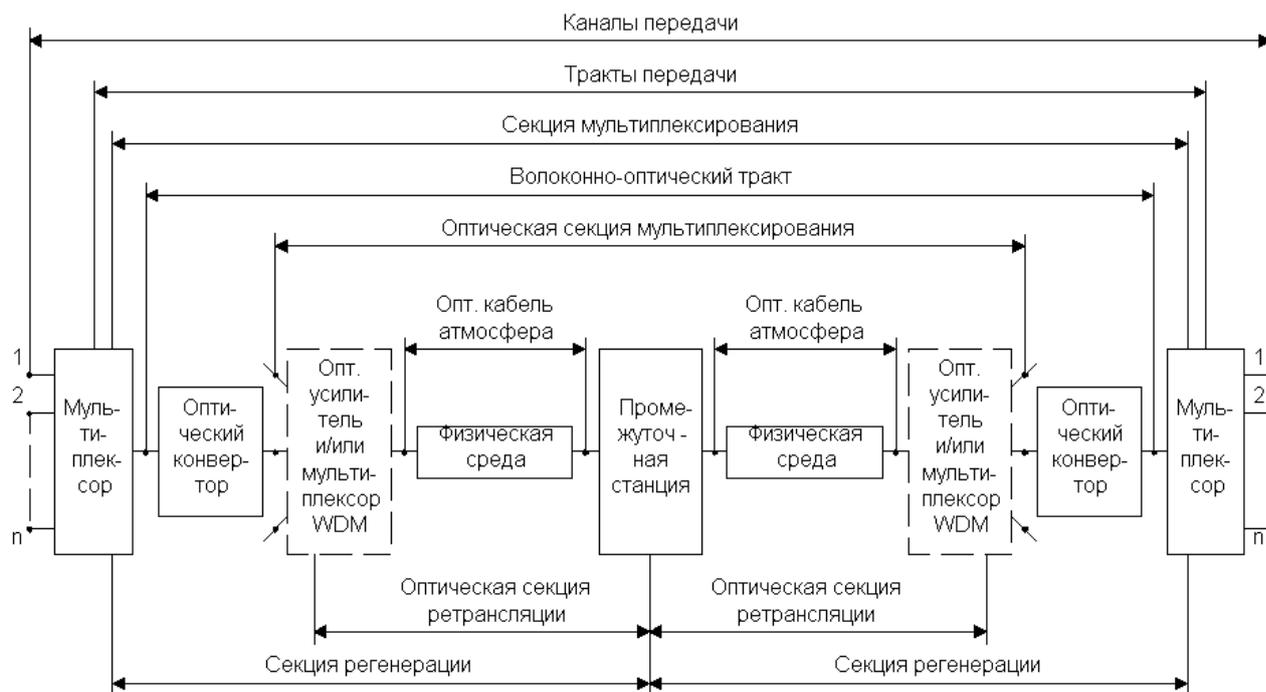


Рисунок 1.1 - Обобщенная схема оптической системы передач

Минимальное значение потерь в стандартном одномодовом волокне 0,2-0,25 дБ/км достигается на длине волны, близкой к 1550 нм. Минимальная хроматическая дисперсия, в окрестности нуля, достигается на длине волны 1310 нм. Чтобы обеспечить высокую скорость передачи на большие расстояния, необходимо свести к минимуму потери и дисперсию, причем на одной и той же длине волны. Прямолинейным ответом было создание волокна со смещенной дисперсией (DSF, волокно G.653). Это волокно, имеющее нулевую дисперсию в окрестности длины волны 1550 нм, обещало быть очень привлекательным для одноканальной передачи. Однако две появившиеся впоследствии технологии - DWDM и EDFA – показали несостоятельность волокна DSF. Четырехволновое смешение, эффект выражающийся в появлении дополнительных паразитных

сигналов на частотах, являющихся комбинацией рабочих частот, которые также усиливаются, проходя через каскады усилителей EDFA. Этот эффект становится заметным при мнговолновой передаче.

В технологии WDM нет многих ограничений и технологических трудностей, свойственных TDM. Для повышения пропускной способности, вместо увеличения скорости передачи в едином составном канале, как это реализовано в технологии TDM, в технологии WDM увеличивают число каналов (длин волн), применяемых в системах передачи (рисунок 1.1). Рост пропускной способности при использовании технологии WDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля.

Применение технологии WDM позволяет сдавать в аренду не только оптические кабели или волокна, но и отдельные длины волн, то есть реализовать концепцию «виртуального волокна». По одному волокну на разных длинах волн можно одновременно передавать самые разные приложения – кабельное телевидение, телефонию, трафик Интернет, “видео по требованию” и т.д. Как следствие этого, часть волокон в оптическом кабеле можно использовать для резерва.

Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку оптических кабелей в существующей сети. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого. Для ее эффективного использования, необходимо иметь возможность в течение долгого времени увеличивать пропускную способность сети и менять набор предоставляемых услуг без замены оптического кабеля. Технология WDM предоставляет именно такую возможность.

Технология WDM пока применяется в основном на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания. Сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения потенциально также являются широким рынком для технологии WDM. Необходимость эффективно использовать проложенный кабель привела к значительному

увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению расстояния между ними.

Теоретически возможна передача в любом диапазоне длин волн, однако практические ограничения оставляют для использования в системах WDM узкий диапазон в окрестности длины волны 1550 нм. Но даже этот диапазон предоставляет огромные возможности для передачи данных. Многочисленные преимущества систем DWDM отражаются на их цене. Во-первых, становятся исключительно важными многие свойства оптических компонентов и характеристики оптического кабеля. Во-вторых, требования к архитектуре сети и выбору компонентов систем WDM являются более жесткими, чем, например, для систем TDM уровня STM-16.

Совместное применение технологий TDM и WDM позволяет значительно расширить спектр предоставляемых услуг, оставляя практически без изменений большую часть имеющегося оборудования.

Главным отличием систем WDM от систем TDM является то, что в системе WDM передача ведется на нескольких длинах волн. Система WDM в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких усилителей EDFA, мультиплексоров ввода/вывода, оптического волокна (кабеля), демультиплексора и соответствующего числа фотоприемников, а также электронного оборудования, которое обрабатывает передаваемые данные в соответствии с используемыми протоколами связи, и системы сетевого управления [7].

Для того, чтобы компоненты систем WDM были взаимозаменяемы и могли взаимодействовать между собой, в системах WDM необходимо использовать стандартный набор частот генерации лазеров. Всеми вопросами, связанными со стандартизацией систем WDM занимается международный орган стандартизации - сектор стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (International Telecommunications Union, ITU) в рамках исследовательской группы SG15 по транспортным сетям, системам и оборудованию (Study Group 15 on Transport Networks, Systems and Equipment). Спецификации ITU-T G.692 по оптическим интерфейсам для многоканальных

систем с оптическими усилителями определяет стандартный набор частот – частотный план систем WDM.

В зависимости от используемого канального плана в системах волнового уплотнения принято выделять три типа мультиплексоров:

- WDM – мультиплексирование с разделением по длине волны;
- DWDM - плотное мультиплексирование с разделением по длине волны;
- HDWDM - высокоплотное мультиплексирование с разделением по длине волны.

Для каждого типа мультиплексоров характерными особенностями являются:

- системы WDM – системы с шагом (разносом) каналов по частоте ≥ 200 ГГц, позволяющие мультиплексирование не более 16 каналов;
- системы DWDM – системы с шагом (разносом) каналов по частоте равным 100 ГГц, позволяющие мультиплексирование не более 64 каналов;
- системы HDWDM – системы с шагом (разносом) каналов по частоте ≤ 50 ГГц, позволяющие мультиплексирование более 64 каналов.

Появление технологии современных технологий (WDM), как и любой новой технологии, одновременно со значительными преимуществами принесло и новые проблемы. Основной проблемой для операторов современных систем WDM является их надежная и стабильная работа. Очень важным становится контроль качества оптических характеристик и поведения системы, начиная от производства компонентов и завершая этапом системной интеграции. Такой контроль гарантирует ввод современной системы оптической связи в эксплуатацию с расчетными параметрами и длительную и устойчивую ее работу.

Несмотря на все сложности встречающиеся на пути проектирования и построения современных систем связи (например, систем волнового уплотнения), применение этих систем экономически оправдано, и по мнению многих специалистов именно по этому направлению будет продолжаться увеличение пропускной способности сетей связи.

2 ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

2.1 Требование к компонентам оптических систем

Основное требование к компонентам современных оптических сетей связи состоит в том, что они должны одинаково обрабатывать все каналы на всем протяжении оптического пути линии связи. Для этого требуется тщательный выбор оптических передатчиков, мультиплексоров, демультиплексоров, усилителей и волокна. Все оптические характеристики пассивных и активных компонентов сети – вносимые потери, потери на отражение, дисперсия, поляризационные эффекты и т.д. должны измеряться как функция длины волны во всем диапазоне длин волн, используемом для передачи в системе связи. В системах WDM часто используют значительно более сложные устройства, чем в системах с одной рабочей длиной волны, и проводить тестирование характеристик таких устройств намного сложнее. В мультиплексорах, демультиплексорах, узкополосных фильтрах систем DWDM используются тонко-пленочные фильтры, сварные биконические разветвители BFT (Fused Biconic Ta-pered Coupler), решетки на основе массива волноводов AWG (Array Waveguide Grating), волоконные брэгговские и обычные дифракционные решетки [7]. Необходимо исследовать влияние активных компонентов (в особенности, оптических усилителей) и взаимной интерференции каналов на целостность передаваемых сигналов для минимизации потенциальной возможности их неблагоприятного воздействия.

Несмотря на то, что все материалы и компоненты при производстве тестируются на соответствие стандартам, возможно ухудшение их характеристик при непосредственной установке в полевых условиях. При объединении отдельных компонентов в единую систему, небольшие различия их характеристик могут накапливаться и непредсказуемым образом влиять на параметры сети в целом. Для обеспечения гарантированной надежности сети, необходимо выполнять тестирование не только каждого компонента в отдельности, но и всей системы в целом. Тестирование компонентов может

вызвать много сложностей. Разница длин волн соседних каналов в системах WDM очень мала, и параметры многих компонентов (например, мультиплексоров) должны строго соответствовать пределам допустимых отклонений. При большом числе каналов используемый спектральный диапазон становится достаточно широким, и поддержание близких значений параметров для всех каналов (коэффициента усиления, дисперсии, уровня вносимых шумов и т.д.) становится достаточно сложной задачей.

2.2 Мультиплексоры и демультиплексоры

Современные оптические мультиплексоры создаются преимущественно на основе тонкопленочных фильтров и, немного реже – на матрицах волноводных дифракционных решеток и волоконных брэгговских решетках. При дальнейшем увеличении плотности размещения каналов в системах WDM и ужесточении требований к оптическим устройствам MUX/DEMUX, по-видимому, будет меняться и спектр используемых технологий.

Тонкопленочный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку.

На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Надлежащим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные (рисунок 2.1).

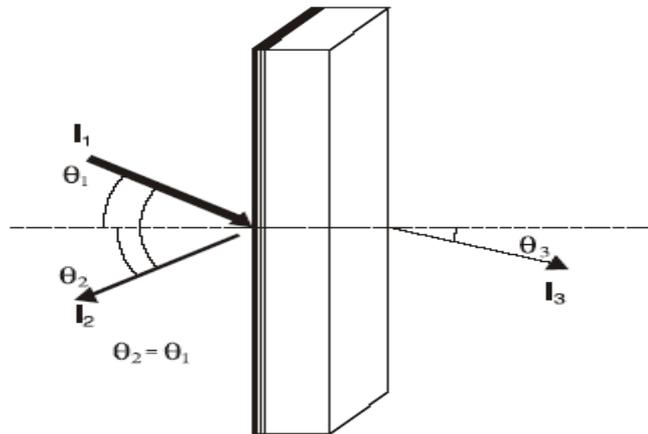


Рисунок 2.1 - Тонкопленочный фильтр

Методы выбора параметров и техника нанесения диэлектрических слоев хорошо известны в оптической промышленности десятки лет. Выбор диэлектрических материалов ограничен, так как многие материалы с хорошими оптическими свойствами имеют физические качества далекие от требуемых. В общем случае, чем жестче требования к фильтру, тем большее число слоев необходимо нанести на подложку. Несмотря на имеющиеся сложности, эта технология позволяет, незначительно изменяя процесс производства, создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

В мультиплексорах и демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попадал обратно в систему. Наклонное расположение фильтров изменяет эффективную толщину слоев и меняет таким образом полосу пропускания, что необходимо учитывать при проектировании фильтров. Для обработки многоволновых сигналов используют многоступенчатые системы фильтров, в которых свет, отраженный от каждого фильтра, попадает на вход следующего фильтра, что придает исключительную важность вопросу их выравнивания (рисунок 2.2).

Тонкопленочные фильтры имеют достаточно узкую полосу пропускания и используются в системах WDM с 16-ю или 32-мя каналами [6]. В современных

системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

Интегральная оптика – относительно новая технология. Для того чтобы полностью использовать ее потенциал, требуются дальнейшие научные исследования и конструкторские разработки.

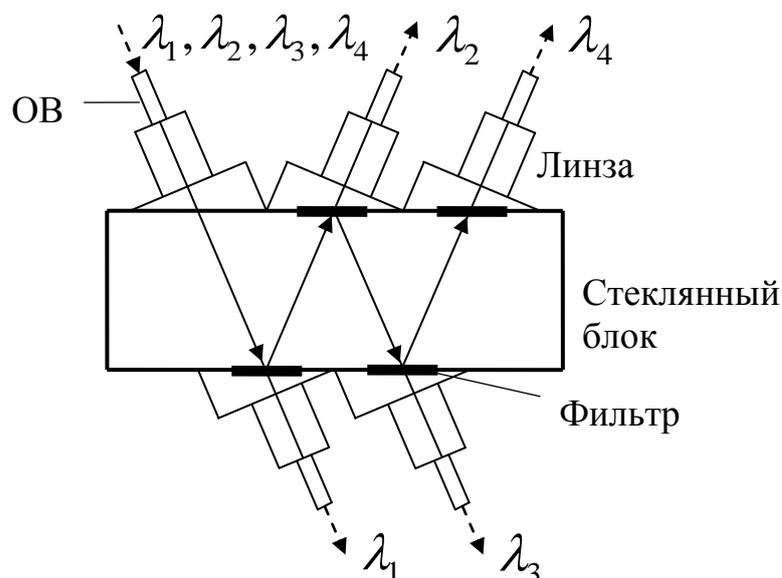


Рисунок 2.2 - Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демultipлексирования составного сигнала

В настоящее время интегральная оптика используется при производстве оптических разветвителей, коммутаторов, модуляторов, эрбиевых и легированных различными редкоземельными элементами волноводных усилителей, брэгговских решеток и других компонентов систем WDM.

Интегральная оптика успешно применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями AWG, рисунок 2.3.

Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны. После этого

световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы [7].

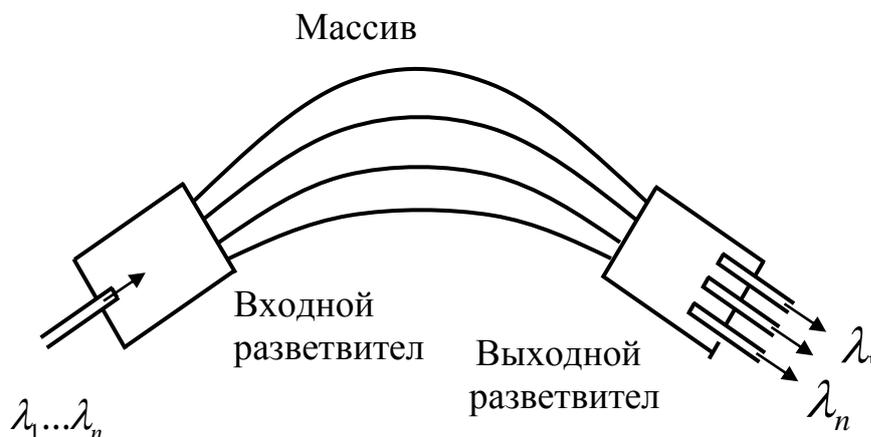


Рисунок 2.3 - Решетка на основе массива волноводов AWG – принцип работы

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон (рисунок 2.3) или выделить (демультиплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем WDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов

Мультиплексоры и демультиплексоры с помощью различных методов волнового разделения объединяют несколько оптических сигналов для передачи по одному волокну и разделяют эти сигналы после передачи. Однако, часто требуется добавить в составной сигнал или выделить из него только один канал, не меняя при этом всю структуру сигнала. Для этого применяют мультиплексоры ввода/вывода каналов OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), которые выполняют эту операцию, не преобразуя сигналы всех каналов в электрическую форму и затем обратно (рисунок 2.4).

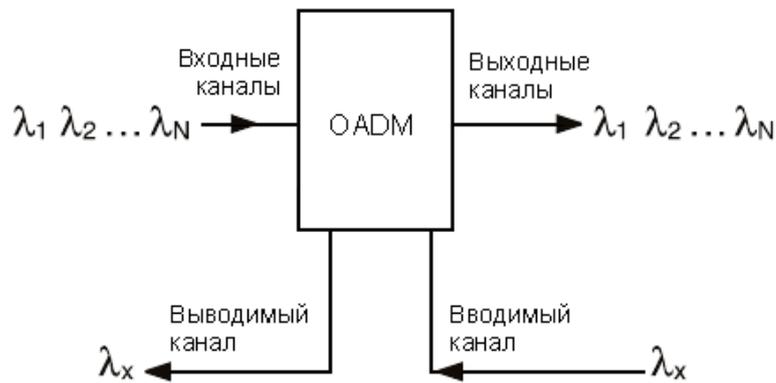


Рисунок 2.4 - Мультиплексор ввода/вывода каналов

При конструировании мультиплексоров ввода/вывода используются технологии, описанные в разделе 2.2. Сегодня на рынке есть разнообразные устройства, позволяющие добавлять и выделять каналы SDH из сетей WDM. Разрабатываются мультиплексоры ввода/вывода, конфигурацию которых можно менять дистанционно.

2.4 Оптические усилители

Усилители на волокне, легированном эрбием EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) за последние несколько лет произвели революцию в телекоммуникационной промышленности. Усилители EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна (рисунок 2.5). Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем WDM стали экономически привлекательными.

Обычные электронные повторители, чтобы восстановить уровень сигнала на протяженной линии связи, считывают сигнал с волокна, преобразуют его в электрические импульсы, усиливают их, преобразуют усиленный сигнал снова в оптическую форму и передают дальше по линии связи. В отличие от них, усилители EDFA полностью "прозрачны" – не зависят от используемых

протоколов, форматов, скорости передачи и (в пределах указанных выше ограничений) длины волны оптического сигнала.

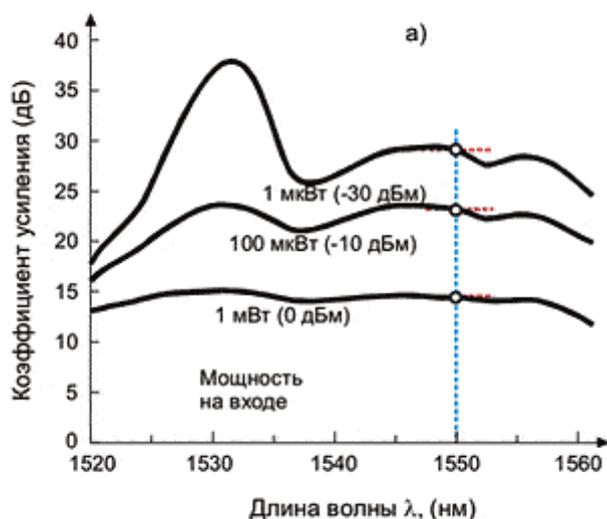


Рисунок 2.5 а - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности

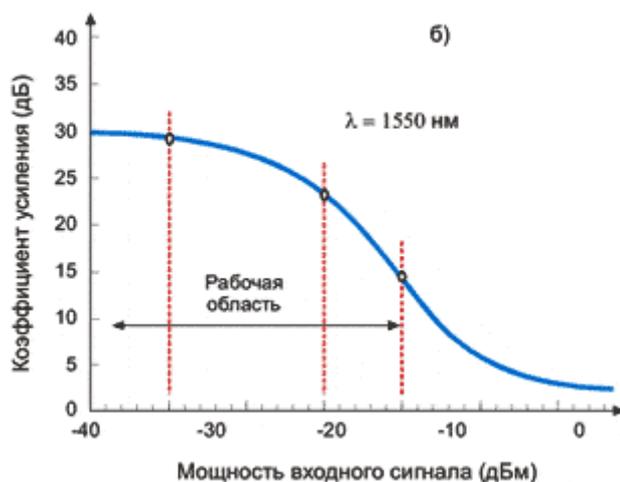


Рисунок 2.5 б - Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм

Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам АТМ или компонентам протокола IP – не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость – одно из основных преимуществ использования их в системах WDM. Наряду с этим, при использовании усилителей EDFA требуется тщательно учитывать их неоднородное спектральное усиление и шум, вносимый

ими за счет усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). Сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети. Каждая линия связи уровня STM-16 обрабатывается в системе WDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем WDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем WDM в эксплуатацию достаточно низка [7].

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки (рисунок. 2.6). Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность накачки. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.

Усилитель EDFA, показанный на рисунок 2.6, состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного эрбием (Er^{3+}), и подходящей накачки. Для подачи сигнала накачки в волокно требуется, по крайней мере, один разветвитель. Длина волны накачки может быть 980 или 1480 нм. Кроме этого ОУ типа EDFA может использовать длины волн накачки в диапазоне 600-700 нм. Для накачки предпочтительно использовать GaAs лазерные диоды, которые достигают эффективности накачки порядка 11 дБ/мВт.

Существуют несколько различных конфигураций EDFA. На рисунке 2.6 показаны три различные конфигурации, используемые для накачки. Рисунок 2.6 (а) показывает использование одного источника накачки в прямом направлении где потоки накачки и сигнала распространяются в одном и том же направлении (сонаправленная накачка). Рисунок 2.6 (б) показывает использование одного источника накачки в обратном направлении (противонаправленная накачка).

Показатели в этом случае примерно одинаковые по сравнению с предыдущей конфигурацией, если мощность сигнала мала по сравнению с уровнем насыщения. В режиме насыщения эффективность преобразования обычно больше при использовании противонаправленной накачки, главным образом благодаря тому, что основную роль играет усиленное спонтанное излучения (ASE). Если важно иметь низкий уровень шума, то лучше использовать сонаправленную накачку.

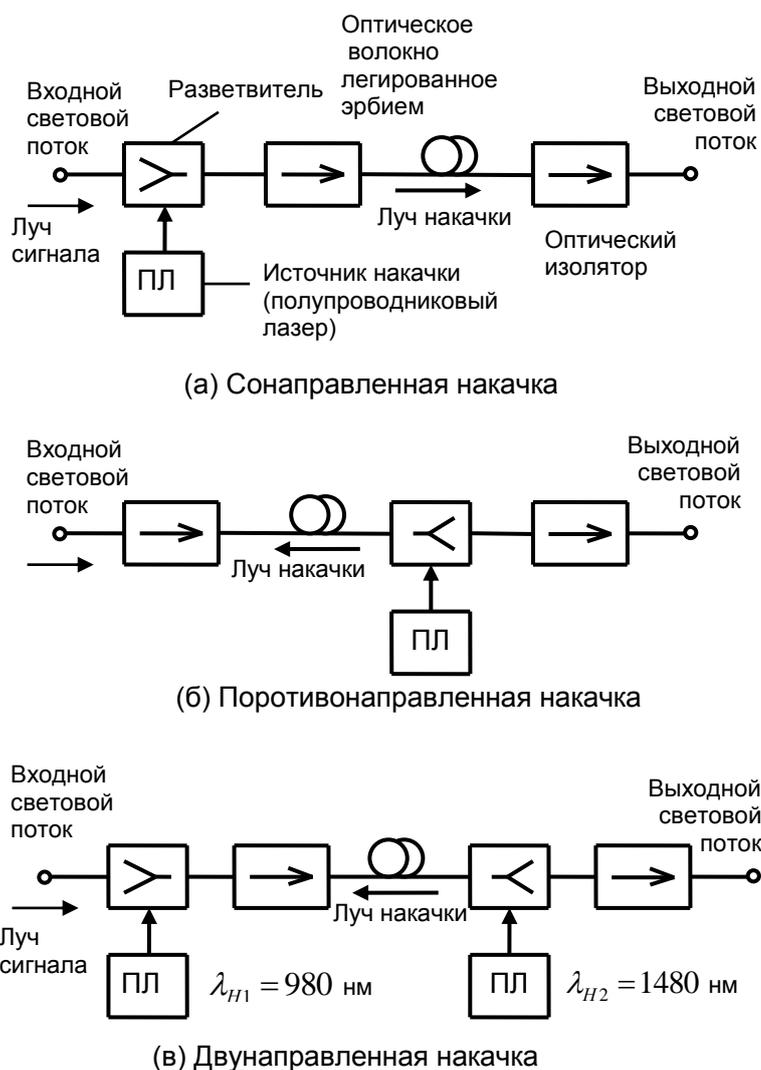


Рисунок 2.6 - Схемы использования усилителей типа EDFA

Существует также двухнаправленная накачка, конфигурация с двумя накачками, показанная на рисунке 2.6 (в), где усилитель накачивается в обоих направлениях одновременно. Обычно для противонаправленной накачки используется длина волны 1480 нм, а для сонаправленной накачки – 980 нм. Это дает возможность использовать сильные стороны каждой из них. Накачка на

1480 нм имеет более высокую квантовую эффективность, но и более высокий коэффициент шума, тогда как накачка на 980 нм может обеспечивать коэффициент шума близкий к квантовому пределу.

Обычно ОУ типа EDFA с одной накачкой обеспечивает выходную мощность порядка +16 дБм в режиме насыщения и коэффициент шума 5-6 (дБ) в режиме малосигнального усиления. Если одновременно используются две накачки, то можно ожидать увеличения выходной мощности до +26 (дБм). Низкое, близкое к квантовому пределу, значение коэффициента шума можно поддерживать в многокаскадном варианте усилителя. При использовании такой схемы один изолятор помещается сразу после первого каскада усиления (который, обычно, определяет коэффициент шума) для защиты от ухудшения показателей первого каскада под действием ASE, которая может распространяться от второго каскада в обратном направлении [7].

Несколько другое направление исследований – усиление за счет стимулированного эффекта рассеяния Рамана (также известного как вынужденное комбинационное рассеяние) в обычном кварцевом волокне. Этот метод в силу своей природы обладает низким шумом и обеспечивает широкий выбор рабочего диапазона длин волн.

Рамановские усилители (Raman amplifiers) позволяет увеличивать число каналов в существующих линиях связи без замены уже установленных EDFA. Они могут успешно применяться в подводных линиях средней протяженности без повторителей (длиной около 300 км), где установка усилителей EDFA требует больших затрат. Однако в рамановских усилителях при усилении возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что ограничивает применение таких усилителей либо одноканальными системами, либо системами WDM с очень большим числом каналов, где влияние такой модуляции устраняется за счет усреднения. Кроме того, рамановские усилители имеют определенные недостатки, связанные с нелинейными эффектами и зависимостью от поляризации. С учетом низкого уровня преобразования сигнала в эффекте рассеяния Рамана в кварцевом

волокне, их применение ограничено узким кругом специфических областей, по крайней мере, на данный момент.

В настоящее время разрабатываются также полупроводниковые оптические усилители SOA (Semiconductor Optical Amplifiers). В них излучение фотонов стимулируется рекомбинацией электронов и дырок в полупроводнике посредством прямой инжекции тока (а не внешней накачкой оптическим излучением, как в случае волокна, легированного эрбием). Такие усилители представляют значительный интерес, поскольку позволяют достичь высокой эффективности усиления и гибкости рабочей длины волны, пусть и с достаточно высоким коэффициентом шума (обычно на 5-6 дБ больше, чем у EDFA, в основном за счет неизбежных потерь на стыке активного слоя с волокном). Как и в рамановских усилителях, в SOA возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что препятствует их применению в системах DWDM с небольшим числом каналов. Однако, эта же перекрестная модуляция может стать преимуществом при использовании усилителей SOA для коммутации или преобразования длин волн. Для усилителей SOA, как и для PDFFA, возникает проблема стыковки с волокном, поскольку толщина активного слоя полупроводникового усилителя значительно отличается от диаметра сердцевины стандартного оптического волокна.

Основные параметры оптического усилителя

Ключевые параметры, характеризующие оптический усилитель – коэффициент усиления, мощность насыщения на выходе усилителя и шум-фактор. Коэффициент усиления G (gain) определяется из соотношения

$$G = \frac{P_{СВЫХ}}{P_{СВХ}}, \quad (2.1)$$

где $P_{СВХ}$ и $P_{СВЫХ}$ - мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя.

Логарифмический эквивалент коэффициента усиления

$$g = 10 \cdot \lg G \text{ (дБ)}. \quad (2.2)$$

Коэффициент усиления оптического усилителя EDFA зависит от длины волны и мощности входного сигнала. Зависимость от длины волны имеет достаточно сложную форму. Она определяется формой энергетических уровней ионов эрбия, их концентрацией, распределением, длиной волны лазера накачки и многими другими параметрами. На рисунке 2.5 а. приведены типовые зависимости от длины волны для трёх фиксированных значений мощности. Более простой вид (вид монотонно убывающей функции) имеет зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала. Такая зависимость для длины волны 1550 нм приведена на рисунке 2.5 в.

Мощность спада на выходе усилителя. $P_{\text{спад}}$ определяется как значение мощности сигнала на выходе, при которой коэффициент усиления G в два раза (g на 3 дБ) меньше максимального значения коэффициента усиления $G_{\text{макс}}$, достигаемого при малом входном сигнале.

Для входных сигналов с высоким уровнем мощности (для усилителя EDFA обычно >3 дБм) усилитель выходит на режим глубокого насыщения коэффициента усиления. Выходная мощность усилителя, равная входной, называется выходной мощностью насыщения (при которой коэффициент усиления равен 1).

Качество оптического сигнала характеризуют величиной, которую принято называть оптическим отношением сигнал-шум (OSNR). OSNR равно отношению мощности полезного сигнала к мощности шума в спектральном интервале $\Delta\nu$, определяемом окном фильтра или демультиплексора на приемной стороне.

$$OSNR = \frac{P_c}{P_{ш}}. \quad (2.3)$$

Значение OSNR должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить требуемую для стандарта передачи максимально допустимую частоту появления ошибок BER. По мере распространения сигнала между регенераторами значение OSNR может только убывать.

Шум фактор NF (noise figure) показывает, как сильно возрастает шум в усилителе по сравнению с полезным сигналом, и определяется как отношение сигнал-шум на входе ($OSNR_{BX}$) к отношению сигнал-шум на выходе ($OSNR_{ВЫХ}$).

$$NF = \frac{P_{CBX}}{P_{ШВХ}} \bigg/ \frac{P_{CBВЫХ}}{P_{ШВВЫХ}} = \frac{OSNR_{BX}}{OSNR_{ВЫХ}}. \quad (2.4)$$

Методика определения коэффициента усиления ОУ от мощности входного сигнала.

Коэффициент усиления – одна из самых важных измеряемых характеристик оптического усилителя. Коэффициент усиления зависит от множества параметров, которые по отдельности или вместе, могут влиять на эффективность усилителя. Коэффициент усиления зависит от длины волны сигнала и мощности входного сигнала. Кривая усиления (рисунке 2.5 а), характеризующая спектральное усиление всех каналов определяется формой энергетических уровней ионов эрбия, их концентрацией, распределением, длиной волны лазера накачки и многими другими параметрами. На рисунке 2.5 а. приведены типовые зависимости от длины волны для трёх фиксированных значений мощности.

Для примера, будем считать, что в данном курсовом проекте проектируется участок транспортной сети с использованием аппаратуры волнового уплотнения Lambda Driver 1600 с используемым диапазоном длин волн от 1536,6 нм до 1560,6 нм с шагом 200 ГГц. Для усиления оптического сигнала используется усилитель EDFA Lucent 1713 с диапазоном усиливаемых длин волн от 1536 нм до 1565 нм. Согласно паспортным данным усилителя коэффициент усиления сигнала на длине волны 1560,6 нм при мощности входного сигнала -30 дБм составляет 30 дБ (режим предусилителя). Данное значение приведено для “наихудшего” 16-го канала, поэтому расчет и построение диаграммы уровней производится для этого канала. Коэффициент усиления для остальных каналов имеет несколько большее значение. Данное явление значительно усложняет производство аппаратуры временного мультиплексирования.

Коэффициент усиления сигнала на длине волны 1560,6 нм при мощности входного сигнала -10 дБм составляет 23 дБ, при мощности входного сигнала 0 дБм – 16 дБ. Зависимость коэффициента усиления усилителя EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности приведена на рисунке 2.7 (а).

Используя паспортные значения коэффициента усиления при мощности входного сигнала построим зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны (рисунке 2.7 (б)).

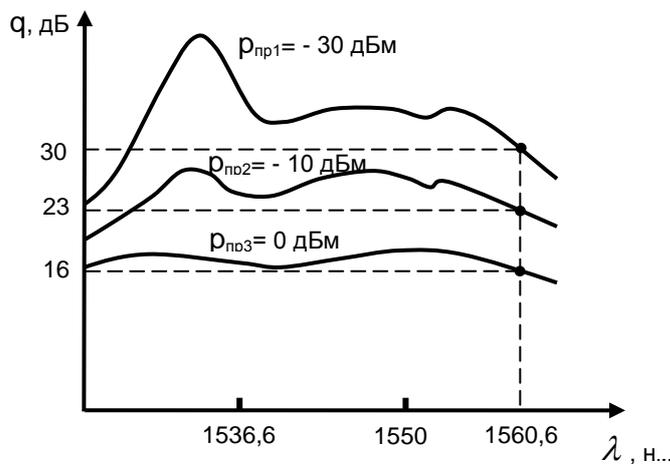


Рисунок 2.7 (а) - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности для усилителя Lucent 1713

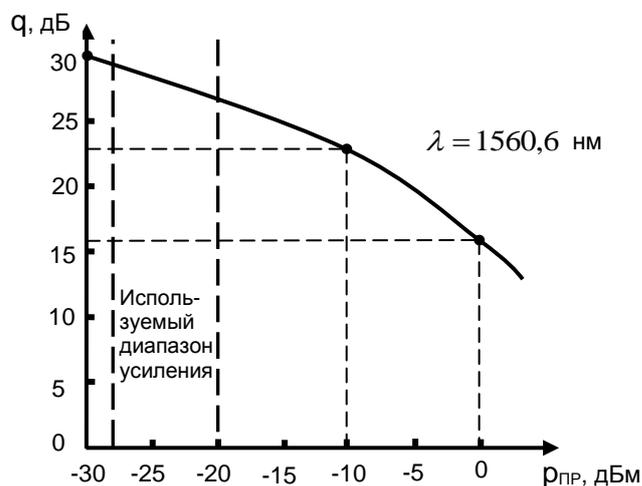


Рисунок 2.7 (б) - Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны для усилителя Lucent 1713

Таким образом, изменение коэффициента усиления в рабочем диапазоне составляет порядка 2 дБ. В дальнейшем, для определения коэффициента усиления от мощности входного сигнала для 16 – го канала используется аппроксимация многочленом второй степени на основе метода наименьших

квадратов. Для получения аппроксимирующей функции составим и решим систему уравнений.

$$\begin{cases} q_1(p_{BX1}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{BX1} + \alpha_2 \cdot p_{BX1}^2 \\ q_2(p_{BX2}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{BX2} + \alpha_2 \cdot p_{BX2}^2 \\ q_3(p_{BX3}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{BX3} + \alpha_2 \cdot p_{BX3}^2 \\ 30 = \alpha_0 - 30 \cdot \alpha_1 + 900 \cdot \alpha_2 \\ 23 = \alpha_0 - 10 \cdot \alpha_1 + 100 \cdot \alpha_2 \\ 16 = \alpha_0 \end{cases}$$

Решение системы: $\alpha_0 = 16$, $\alpha_1 = -0,816$, $\alpha_2 = -0,0116$.

Таким образом, искомая аппроксимирующая функция имеет вид:

$$q = 16 - 0,816 \cdot p_{BX} - 0,0116 \cdot p_{BX}^2 .$$

В дальнейшем, в расчетной части, при определении коэффициента усиления от мощности входного сигнала для усилителя Lucent 1713 предполагается использовать данную функцию.

2.5 Передатчики

В первых волоконно-оптических передатчиках электрические и электронно-оптические элементы представляли собой отдельные модули. Современные передатчики имеют гибридную конструкцию. Лазеры и интегральные микросхемы, модулирующие излучение, объединены в единый компактный модуль, что позволяет достичь больших частот модуляции и высокой надежности. Такой модуль является по сути электронно-оптическим преобразователем, в котором интенсивность выходного светового сигнала модулируется входным цифровым электрическим сигналом. При низких скоростях передачи, модулируется управляющий ток (лазеры с внутренней модуляцией), при высоких – сам оптический сигнал (лазеры с внешней модуляцией). Передатчик для одного канала обычно представляет собой лазер с распределенной обратной связью DFB (Distributed Feed Back) с выходной

мощностью в волокне не менее 0 дБм (1 мВт) и модулятор [7]. При высоких частотах модуляции модулятор обычно внешний.

В системах DWDM наиболее широко применяют DFB-лазеры с резонатором типа Фабри-Перо. При этом дифракционная решетка выполнена на поверхности активной части кристалла лазера, что обеспечивает точный выбор длины волны лазерного излучения за счет оптической обратной связи (рис. 2.8). С помощью дифракционной решетки обеспечивается усиление излучения только одной продольной моды лазера таким образом, что вся мощность сигнала концентрируется в очень узкой области спектра (ширина линии на половине высоты менее 100 МГц). При этом боковые моды подавляются до уровня не менее 40 дБ) [5].

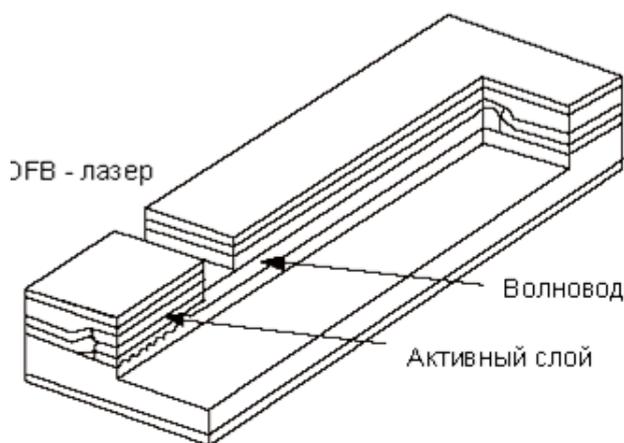


Рисунок 2.8 - Упрощенный вид кристалла DFB-лазера

DFB-лазеры имеют несколько недостатков. Из-за очень узкой ширины линии генерации (и соответственно большой длины когерентности) они чувствительны к отраженному в линии сигналу, попадающему обратно активную область усиления лазера. Если в линии создаются параллельные частично отражающие поверхности в пределах длины когерентности лазера, это приводит к возникновению отраженного сигнала, когерентного с излучением лазера. Попадая в резонатор лазера, такой сигнал интерферирует с полезным сигналом и нарушает стабильность генерации лазера. Причем, интенсивность отраженного сигнала может иметь максимум при определенных температурах, что делает стохастическим и трудноуправляемым появление этого эффекта.

2.6 Фотоприемники

Оптический фотоприемник преобразует входные оптические сигналы в электрические и осуществляет таким образом их демодуляцию. Фотоприемник должен быть полностью совместим с передатчиком как по спектральной области чувствительности в пределах номинальных длин волн, так и временным характеристикам модуляции излучения. Кроме того, фотоприемник должен обладать устойчивостью к ошибкам, которые могут возникнуть в сигнале при прохождении других оптических компонентов.

Оптический сигнал подается на фотоприемник непосредственно из волокна, что обеспечивается традиционным способом – их торцевой стыковкой. Полученный на фотоприемнике электрический сигнал необходимо усилить до требуемого уровня, внося при этом как можно меньше шумов. Может понадобиться также электронная фильтрация, для сглаживания эффективного частотного отклика усилителя. Все эти операции обычно выполняются одним гибридным модулем (включающим и модуль приемника), на который поступает входной оптический сигнал из волокна. Модуль формирует на выходе отфильтрованный электрический сигнал, который затем требуется соответствующим образом демодулировать. Сложность процесса демодуляции зависит от используемой технологии модуляции. Например, при использовании технологии TDM необходимо выделить из поступившего сигнала сигналы синхронизации, для чего могут использоваться различные схемы выявления и исправления ошибок.

Обычно в качестве фотоприемников используется два типа фотодиодов [2]: PIN- фотодиоды и лавинные фотодиоды APD (Avalanche Photodiode). PIN- фотодиоды работают со стандартными низковольтными источниками питания (5 В), но они менее чувствительны и имеют более узкую область спектральной чувствительности по сравнению с лавинными фотодиодами. До появления лавинных фотодиодов высокоскоростные PIN- фотодиоды использовались на линиях связи со скоростями передачи 10 Гбит/с и 40 Гбит/с. Лавинные фотодиоды в основном применяются на линиях связи

большой протяженности, где оправданы их высокая стоимость и значительно более сложные схемы регистрации оптических сигналов [7]. Кроме того, во многих случаях использование фотоприемника с лавинным фотодиодом позволяет отказаться от оптического предусилителя, необходимого в фотоприемнике с PIN- фотодиодом.

2.7 Оптическое волокно

Стандартное волокно

Оптическое волокно, уложенное в кабель, является одним из важнейших компонентов волоконно-оптической сети. Волокно – та физическая среда, по которой осуществляется передача информации. Первые волокна, которые стали широко использоваться на линиях связи большой протяженности – одномодовые волокна со ступенчатым показателем преломления и нулевой дисперсией на длине волны 1310 нм (G.652 по классификации ITU), стандартные одномодовые волокна. В 1980-е годы было проложено более 80 миллионов километров кабеля с такими волокнами. Несмотря на рост скоростей передачи данных и появление технологии DWDM, позволяющей во много раз увеличить пропускную способность уже проложенного кабеля, интенсивность прокладки кабеля во всем мире в обозримом будущем не упадет.

Хотя стандартное волокно G.652 имеет нулевую хроматическую дисперсию на длине волны 1310 нм, его дисперсия на длине волны 1550 нм достаточно высока (18 пс/нм/км). На первый взгляд, это несовместимо с рабочим диапазоном EDFA (область 1550 нм). Однако недавние исследования показали, что передача каналов DWDM умеренной скорости по волокну G.652 может происходить на значительные расстояния без потери качества сигнала. Во многом это достигается за счет того, что высокая дисперсия на длине волны 1550 нм может быть компенсирована с помощью отрезка специального волокна или других устройств компенсации дисперсии.

Волокно со смещенной дисперсией.

Производители волокна разработали волокно со смещенной дисперсией (G.653 по классификации ITU), которое имеет нулевую дисперсию на длине

волны около 1550 нм. На этой длине волны затухание ниже, чем на 1310 нм, а потому работа в окне 1550 нм более предпочтительна, особенно для линий связи большой протяженности. Однако, волокно со смещенной дисперсией не является безусловно лучшим для передачи каналов DWDM. Показатель дисперсии достаточно резко изменяется при отдалении от длины волны нулевой дисперсии, из-за чего приходится отдельно компенсировать дисперсию каждого канала.

Волокно со смещенной дисперсией оказалось неудачным при передаче составного сигнала DWDM. При передаче по каналу связи составного сигнала DWDM необходимо вводить в волокно сигнал очень большой мощности, из-за чего в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты. В волокне со смещенной дисперсией влияние эффекта четырехволнового смешения FWM ограничивает использование длин волн, близких к длине волны нулевой дисперсии 1550 нм. Следует отметить, что эффект FWM можно уменьшить, если передавать составной сигнал DWDM на длинах волн, достаточно удаленных от длины волны 1550 нм в одну или другую сторону. Однако при этом становится невозможно использовать любые длины волн из частотного плана ITU.

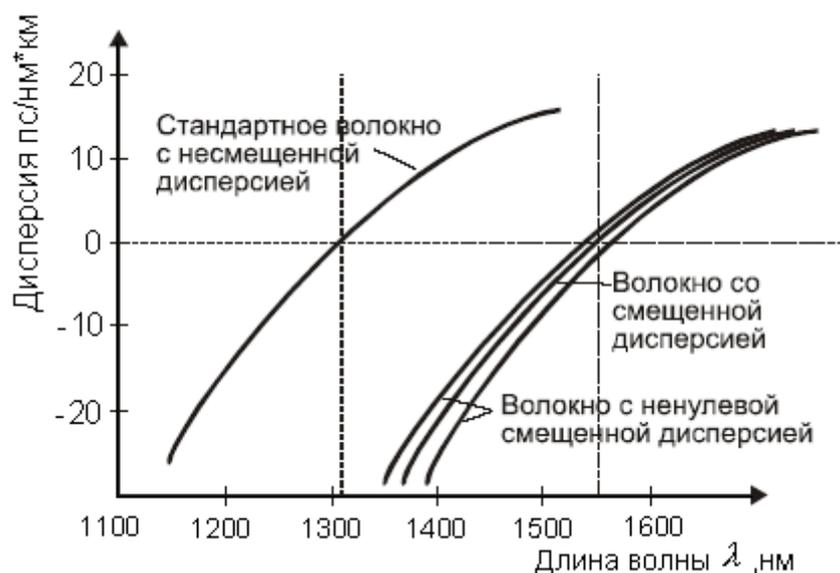


Рисунок 2.9 - Типичные значения дисперсии для различных типов оптических волокон

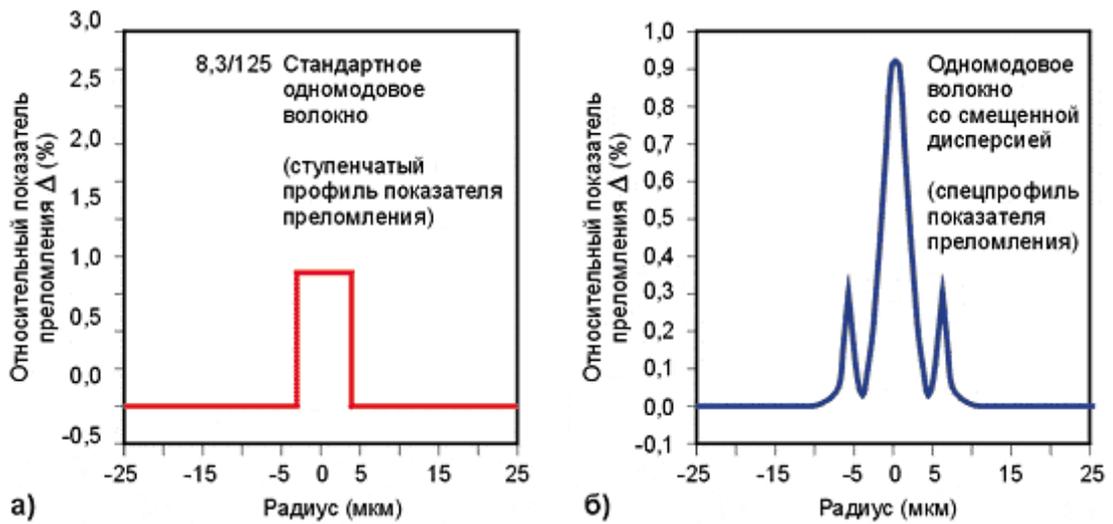


Рисунок 2.10 - Типичные профили коэффициента преломления для одномодовых оптических волокон

Волокно с ненулевой смещенной дисперсией

Для подавления нелинейных эффектов, и особенно FWM, были разработаны волокна, в которых длина волны нулевой дисперсии выведена из рабочего диапазона усилителей EDFA (1530-1565 нм) за счет специальных профилей показателя преломления (рисунок 2.10) – волокна с ненулевой смещенной дисперсией (G.655 по классификации ITU). В пределах рабочего диапазона EDFA волокно G.655 имеет небольшую, хорошо контролируруемую хроматическую дисперсию (от более чем 3 пс/нм/км на 1530 нм до менее чем 0,7 пс/нм/км на 1560 нм). Такого значения дисперсии вполне достаточно, чтобы подавить FWM – при этом еще возможна передача со скоростью, по меньшей мере, 2,5 Гбит/с на канал. Волокна G.655 наилучшим образом подходят для использования в системах DWDM.

3 РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО И УСИЛИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ

3.1 Определение необходимого качества передачи системы СВЯЗИ

Работа цифровых систем связи считается нормальной только в том случае, если коэффициент битовых ошибок BER не превышает определённый допустимый уровень, зависящий от используемого сетевого стандарта. Современные линии связи строятся так, чтобы удовлетворить любому сетевому стандарту. Поэтому при их расчёте и строительстве закладываются достаточно жёсткие ограничения уровня ошибок (от $BER=10^{-11}$ до $BER=10^{-15}$). Рассмотрим теперь работу фотоприёмника. Будучи синхронизированным, с приходящим оптическим сигналом, фотоприёмник периодически в оптимальные моменты времени проводит обработку принимаемого сигнала – регистрирует интенсивность оптического сигнала и по определённому пороговому значению решает, какой сигнал принят – 0 или 1.

К снижению качества цифровой передачи приводит много факторов: дисперсия, нелинейные эффекты в волокне, нестабильность таймеров, усиленное спонтанное излучение и др.

Для расчета BER требуется знание только одного параметра – Q-фактора, который аналитически выражается через функцию ошибок.

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}. \quad (3.1)$$

Зададим достаточно жёсткое ограничение уровня ошибок $BER=10^{-12}$.

Если задано требуемое значение BER то, пользуясь выражением можно найти требуемое значение Q-фактора.

$$10^{-12} = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}};$$

$$Q=7,03.$$

Вычислим допустимое отношение сигнал-шум, которое обеспечивает данное значение Q-фактора.

$$\left(\frac{C}{Ш}\right) = \frac{Q^2 \cdot \Delta f_E}{\Delta f_o}, \quad (3.2)$$

где Δf_E - полоса пропускания электрического фильтра фотоприёмника.

Для систем WDM обеспечивающих передачу потоков информации до 2,5 Гбит/с $\Delta f_E = 2,5$ ГГц.

Δf_o - исходная спектральная полоса в оптическом диапазоне, которую можно принять равной ширине спектра узкополосного лазера. Обычно эта ширина не более 0,1 нм, что соответствует $\Delta f_o = 12,5$ ГГц. Отсюда находим

$$\left(\frac{C}{Ш}\right)' = \frac{(7,03)^2 \cdot 2,5}{12,5} = 9,88.$$

Для дальнейших расчетов отношение сигнал-шум удобно выразить в децибелах, которое в технике связи обычно называется помехозащищенностью и определяется по следующей формуле

$$A'_3 = 10 \cdot \lg\left(\frac{C}{Ш}\right)' \quad (\text{дБ}) \quad (3.3).$$

Подставляя в формулу (3.3) значение отношение сигнал-шум получаем

$$A'_3 = 10 \cdot \lg 9,88;$$

$$A'_3 = 9,95 \quad (\text{дБ}).$$

Для расчетов примем

$$A'_3 = 10 \quad (\text{дБ}).$$

Данное значение справедливо для идеального фотоприемника. В виду ухудшения защищенности сигнала в реальном фотоприемнике, а также с учетом деградации характеристик передающего и приемного оптоэлектронных модулей на практике необходимо ввести эксплуатационный запас равный от 5 до 10 дБ. Примем $A_{3АП} = 5$ дБ.

$$A_3 = A'_3 + A_{3АП}. \quad (3.4)$$

Таким образом, требуемое значение помехозащищенности сигнала составляет:

$$A_3 = 10 + 5 = 15 \quad (\text{дБ}).$$

3.2 Определение максимальной длины усилительного участка

При определении длины усилительного участка считаем, что потери складываются из: затухания оптического кабеля, затухания разъёмных оптических соединителей, потерь в местах сращивания строительных длин, потерь вносимых волокном для компенсации дисперсии, потерь вносимых аттенуаторами, устанавливаемых в тех местах участка транспортной сети, где уровень сигнала больше максимально-допустимого значения на входе приемного модуля, и т.д.

В курсовом проекте предполагается использовать кабель, соответствующий рекомендации МСЭ - Т G.652, для этого кабеля коэффициент затухания примем $\alpha_K = 0,2 \left(\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right)$.

Затухание разъёмного оптического соединителя примем[6]:

$$A_p = 0,5 \text{ (дБ)}.$$

На каждом усилительном участке используется не более двух разъёмных соединений, то есть $n_p = 2$

Потери в местах сращивания строительных длин (затухания сварного соединения) примем [7]:

$$A_{CB} = 0,03 \text{ (дБ)}.$$

Строительная длина кабеля составляет 2 - 4 км, примем $l_{СТР} = 2$ км.

Кроме того, на регенерационном участке, ввиду большой его протяжённости (порядка 700-1000 км), и достаточно большим значением дисперсионного параметра $D = 18$ пс/нм/км общая дисперсия будет составлять [7]:

$$\Delta T = D \cdot L \cdot \Delta \lambda, \quad (3.5)$$

где L – длина регенерационного участка;

$\Delta \lambda$ – ширина спектра оптического источника (примем $\Delta \lambda = 0,1$ (нм)).

При длине 700 км эта величина

$$\Delta T = 18 \cdot 700 \cdot 0,1 = 1,26 \text{ (нс)},$$

что значительно больше максимально-допустимого значения определяемого для кода NRZ как [7]:

$$\Delta T_M = \frac{0,7}{B},$$

где B – скорость передачи.

Подставляя в эту формулу $B=2,5$ Гбит/с, получаем

$$\Delta T_M = \frac{0,7}{2,5 \cdot 10^9} = 0,28 \text{ (нс)}.$$

Отсюда видно, что $\Delta T \gg \Delta T_M$.

То есть на данной линии необходимо компенсировать дисперсию. Один из путей компенсации дисперсии – использование волокна компенсирующего дисперсию (DCF). При проектировании для компенсации дисперсии используем волокно компании Fujikura 15DS-340. Дисперсионный параметр D такого волокна имеет противоположный знак и значение $D= -340$ пс/нм·км. Это волокно вносит достаточно большие потери, составляющие $\alpha_{кд} = 1,56$ дБ/км.

Длина DCF (L_2) может быть вычислена по формуле [7]:

$$L_2 = -\frac{D_1 \cdot L_1}{D_2}, \quad (3.6)$$

где L_1 – длина линии с обычным волокном;

L_2 – длина волокна DCF;

D_1 и D_2 - дисперсионные параметры обычного волокна и волокна DCF.

Применительно к усилительному участку длиной L_{yc} формула (3.6) имеет вид

$$L_2 = -\frac{D_1 \cdot L_{yc}}{D_2}.$$

Затухание, вносимое волокном DCF, будет составлять

$$A_{кд} = \alpha_{кд} \cdot L_2;$$
$$A_{кд} = -\frac{\alpha_{кд} \cdot D_1 \cdot L_{yc}}{D_2}. \quad (3.7)$$

С учётом всех вышесказанных рассуждений запишем формулу для определения длины усилительного участка, ограниченного потерями

$$L_{YC} = \frac{q + \alpha_{KD} \cdot \frac{L_{YC} \cdot D_1}{D_2} - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{CTP}}};$$

$$L_{YC} = \frac{q - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{CTP}} - \frac{\alpha_{KD} \cdot D_1}{D_2}}, \quad (3.8)$$

где q – коэффициент усиления оптического усилителя на волокне легированного эрбием.

В рассматриваемом курсовом проекте используется усилитель Lucent с минимальной мощностью входного сигнала $p_{ПРМИН} = -30$ дБм. В виду деградации со временем характеристик оптического кабеля введем эксплуатационный запас равный 2 дБ. Таким образом, минимальный уровень мощности, поступающий на вход оптического усилителя составляет:

$$p_{ПР} = -30 + 2 = -28 \text{ (дБм)}.$$

Методика определения коэффициента усиления представлена в разделе (2.4). В соответствии с полученным в разделе (2.4) выражением $q = 16 - 0,816 \cdot p_{ВХ} - 0,0116 \cdot p_{ВХ}^2$, получаем для входного уровня $p_{ВХ} = -28$ дБм

$$q = 29,6 \text{ (дБ)}.$$

Таким образом, мощность сигнала на выходе оптического усилителя составляет:

$$p_{ПЕР} = p_{ПР} + q \quad (3.10).$$

Подставим полученные значения, получаем

$$p_{ПЕР} = -28 + 29,6 = 1,6 \text{ (дБм)}.$$

Воспользовавшись формулой (3.8) имеем

$$L_{YC} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}};$$

$$L_{YC} = 96 \text{ (км)}.$$

3.3 Определение максимальной длины регенерационного участка

Процесс накопления шума будет происходить на протяжении всей длины регенерационного участка. По аналогии с электронными усилителями аналоговых систем передачи с ЧРК введем понятие уровня шума $P_{ш.вх}$, приведенного ко входу ВОУ. Мощность шума на выходе ВОУ состоит из мощности усиленной спонтанной эмиссии $P_{ASE} = (NF \cdot G - 1) \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta\nu$ и мощности квантового шума $P_{ш.кв} = h \cdot \nu \cdot \Delta\nu$.

Таким образом

$$P_{ш.вх} = (NF \cdot G - 1) \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta\nu + h \cdot \nu \cdot \Delta\nu, \quad (3.11)$$

где h - постоянная Планка ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);

ν - частота сигнала узкополосного лазера подаваемого на вход линии;

$\Delta\nu$ - ширина спектра оптического фильтра демультиплексора;

nf - шум-фактор оптического усилителя.

Согласно данным, представленных в [7] примем, $\Delta\lambda = 0,1$ (нм). Согласно паспортным данным используемого ОУ $nf = 6$ (дБ).

Определим частоту ν , соответствующую длине волны $\lambda = 1550$ (нм).

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{где } c = 299792458 \frac{м}{с} \quad (\text{Данное точное значение принято в}$$

рекомендации ИТУ – Т G.692 для преобразования частоты в длину волны и наоборот [15]).

$$\nu = \frac{299792458}{1550 \cdot 10^{-9}} = 193,4 \cdot 10^{12}.$$

$$\nu = 193,4 \text{ (ТГц)}.$$

Ширине полосы пропускания оптического фильтра $\Delta\lambda = 0,1$ (нм), соответствует значение, выраженное через $\Delta\nu$ [6]

$$\Delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2};$$

$$\Delta\nu = \frac{299792458 \cdot 0,1}{(1550 \cdot 10^{-9})^2} = 12,5 \cdot 10^9 \text{ (Гц)};$$

$$\Delta\nu = 12,5 \text{ (ГГц)}.$$

Учитывая, что $NF \cdot G \gg 1$, после простых преобразований выражения (3.11) получим

$$P_{Ш.ВХ} = -69 + 10 \cdot \lg \Delta \nu + nf, \quad (3.12)$$

где $\Delta \nu$ выражена в ГГц.

Таким образом, уровень шумов приведенный ко входу оптического усилителя составляет:

$$P_{Ш.ВХ} = -69 + 10 \cdot \lg \cdot 12,5 \cdot 10^9 + 6 = -52 \text{ (дБм)}.$$

Рассмотрим методику нахождения результирующей помехозащищенности на участке регенерации, состоящего из n усилительных участков.

На рисунке 3.1 приведен фрагмент диаграммы уровней, на котором имеется N оптических усилителей. Как следует из этого рисунка помехозащищенность от шума, на i -том участке

$$A_{3,i} = P_{ПР,i} - P_{Ш.ВХ}, \quad (3.13)$$

где $P_{ПР,i}$ – уровень сигнала на входе i -того усилительного участка.

$$P_{ПР,i} = P_{ПЕР,i} - \alpha \cdot l_i, \quad (3.14)$$

где $\alpha \cdot l_i$ – затухание i -того усилительного участка.

Таким образом

$$A_{3,i} = P_{ПЕР,i} - \alpha \cdot l_i - P_{Ш.ВХ}. \quad (3.15)$$

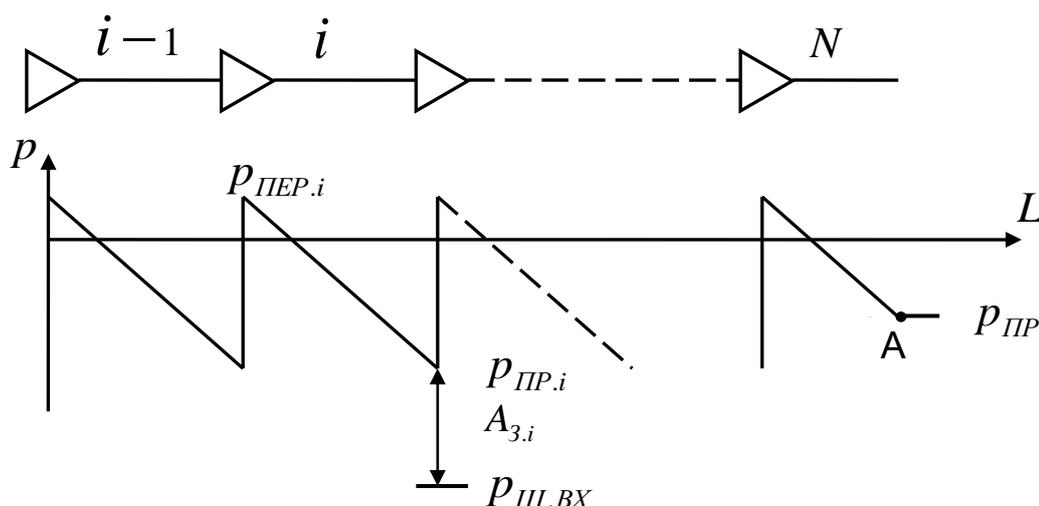


Рисунок 3.1 - Диаграмма уровней сигнала

В произвольной точке на выходе цепочки ВОУ с уровнем сигнала $p_{\text{ПР}}$ (очевидно, что в качестве такой точки следует принять вход фотоприемника регенерационного пункта) помехозащищенность от шума, вносимого этим участком не изменится и составит

$$A'_{3,i} = p_{\text{ПР}} - p_{\text{Ш},i}, \quad (3.16)$$

где $p_{\text{Ш},i}$ – уровень шума от i -го усилительного участка.

Очевидно, что $A_{3,i} = A'_{3,i}$. Отсюда следует

$$\begin{aligned} p_{\text{ПЕР},i} - \alpha \cdot l_i - p_{\text{Ш},\text{ВХ}} &= p_{\text{ПР}} - p_{\text{Ш},i}; \\ p_{\text{Ш},i} &= p_{\text{ПР}} + p_{\text{Ш},\text{ВХ}} - p_{\text{ПЕР},i} + \alpha \cdot l_i. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Следовательно, мощность помех от i -го усилительного участка составит (в точке А)

$$P_{\text{Ш},i} = 10^{0,1 \cdot p_{\text{Ш},i}} \quad (\text{мВт}).$$

Шумы, возникающие на отдельных усилительных участках имеют независимый характер, поэтому суммарная мощность шума в точке А составит

$$\begin{aligned} P_{\text{ш},\Sigma} &= \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot p_i}; \\ P_{\text{ш},\Sigma} &= \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot (p_{\text{ПР}} + p_{\text{Ш},\text{ВХ}} - p_{\text{ПЕР},i} + \alpha \cdot l_i)}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

В предположении, что каждый усилительный участок имеет одинаковые параметры (длину участка, затухание, мощности сигнала на входе и выходе оптического усилителя), в формуле (3.18) знак суммирования можно заменить на умножение.

Данный подход позволяет достаточно точно определить максимальную длину регенерационного участка, но требует после построения сети и определения основных параметров каждого усилительного участка рассчитать помехозащищенность спроектированного регенерационного участка.

$$P_{\text{ш},\Sigma} = N \cdot 10^{0,1 \cdot (p_{\text{ПР}} + p_{\text{Ш},\text{ВХ}} - p_{\text{ПЕР}} + \alpha \cdot l)}; \quad (3.19)$$

$$p_{\text{ш},\Sigma} = 10 \cdot \lg N + p_{\text{ПР}} + p_{\text{Ш},\text{ВХ}} - p_{\text{ПЕР}} + \alpha \cdot l. \quad (3.20)$$

Защищенность в точке А составляет:

$$A_{3,A} = p_{\text{ПР}} - p_{\text{ш},\Sigma}$$

Подставим в данное выражение формулу (3.20)

$$A_{3.A} = p_{\text{ПР}} - 10 \cdot \lg N - p_{\text{ПР}} - p_{\text{Ш.ВХ}} + p_{\text{ПЕР}} - \alpha \cdot l;$$

$$A_{3.A} = p_{\text{ПЕР}} - 10 \cdot \lg N - p_{\text{Ш.ВХ}} - \alpha \cdot l. \quad (3.21)$$

Формулу (3.21) можно преобразовать, воспользовавшись связью усиления в усилителе с длиной участка l между усилителями и удельного затухания участка α , и связью количества усилительных участков с длиной регенерационного участка L , и усилительного участка $L_{\text{УС}}$.

$$q = \alpha \cdot l; \quad (3.22)$$

$$n = \frac{L}{L_{\text{УС}}}. \quad (3.23)$$

Таким образом, формула (3.21) примет вид

$$A_{3.A} = p_{\text{ПЕР}} - q - p_{\text{Ш.ВХ}} - 10 \cdot \lg \frac{L}{L_{\text{УС}}}. \quad (3.24)$$

Подставим все необходимые значения в данную формулу и приняв в точке А требуемую помехозащищенность сигнала, равную 15 дБ получаем

$$15 = 1,6 - 29,6 + 52 - 10 \cdot \lg \frac{L}{96}.$$

Отсюда следует $L = 794$ (км).

На сегодняшний момент длины регенерационных участков линий связи составляют около 700 – 1000 км.

4 СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ

4.1 Составление схемы организации связи

Из многообразия базовых топологий оптических сетей основными являются «последовательная линейная цепь», «кольцевая структура» и их комбинации в сочетании с топологией «точка-точка» [1, глава 7].

Один из вариантов схемы организации связи с использованием топологии «последовательная линейная цепь» и синхронного транспортного модуля типа STM-4 приведен на рис. 4.1.

Как следует из рис. 4.1, в пунктах А и Г используются ВОСП на основе STM-4 (S4) с окончанием на 2 тракта STM-1 (Sx) и 126 трактов E1 (возможен вариант с окончанием на 2 тракта E4 или на 2 тракта STM-1 и 6 трактов E3).

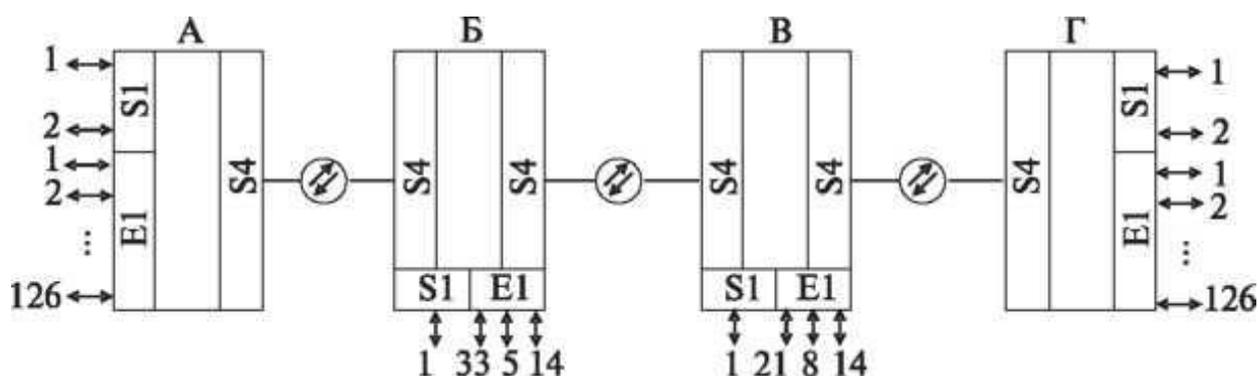


Рисунок 4.1 - Вариант схемы организации связи с использованием топологии «последовательная линейная цепь» и аппаратуры STM-4

В пунктах Б и В используются мультиплексоры ввода/вывода ВОСП с вводом/выводом одного тракта STM-1 (S1) для организации канала телевидения и вводом/выводов потоков E1; в пункте Б для 33 потоков E1 для связи с пунктом А, 5 потоков E1 для связи с пунктом В и 14 потоков E1 для связи с пунктом Г; мультиплексор ввода/вывода в пункте В для организации 21 потока E1 с пунктом А, для организации 8 потоков E1 с пунктом Б и 15 потоков E1 для организации связи с пунктом Г. Следовательно, эта схема позволяет организовать необходимое число потоков для передачи разнообразных сообщений, в том числе и телевидения.

Далее будут рассмотрены особенности проектирования цифровых одноволновых ВОСП с использованием аппаратуры синхронной цифровой иерархии (СЦИ, SDH) [1, глава 6]. С особенностями проектирования цифровых многоволновых ВОСП [1, глава 8] с использованием аппаратуры спектрального разделения каналов можно ознакомиться в [1, глава 9, п.9.5]

4.2 Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ и типа оптического кабеля

Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ первоначально сводится к определению оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендаций МСЭ-Т G.957 и G.691 (для систем с применением оптических усилителей). После этого выбирается аппаратура и её производитель, а затем – тип оптического кабеля и его производитель. Отметим, что рекомендациям МСЭ-Т G.957 и G.691 соответствуют применяемые на территории Российской Федерации отраслевые стандарты ОСТ 45.104 и ОСТ 45.178 [1].

Линейную структуру магистрали ВОСП СЦИ принято представлять в виде последовательного соединения ряда оптических секций, определенных в указанных рекомендациях. Оптические секции кодируются с использованием кода применения, который по рекомендации G.957 и G.691 имеет следующий вид:

Тип применения – (тире) **Уровень STM**. **Цифровой символ**, где **Тип применения** обозначается латинской буквой:

I — для внутриобъектовой связи (Intra);

S — для короткой межстанционной связи (Short);

L — для длинной межстанционной связи (Long);

V — для очень длинной межстанционной связи (Very long);

U — для сверхдлинной межстанционной связи (Ultra long);

Уровень STM обозначается цифрой N ($N = 1, 4, 16, 64$);

Цифровой символ определяет номинальную длину волны источника излучения и тип применяемого волокна:

1 — номинальная длина волны 1310 нм и волокно G.652;

2 — номинальная длина волны 1550 нм и волокно G.652 (G.654);

3 — номинальная длина волны 1550 нм и волокно G.653;

5 — номинальная длина волны 1550 нм и волокно G.655.

В *коде применения* I рекомендации G.957 цифровой символ отсутствует, так как здесь всегда используется номинальная длина волны 1310 нм и волокно G.652. Следует также отметить, что в России самым распространенным оптическим волокном является ОВ рекомендации G.652 (более 90 % из всего проложенного). Кроме того, в кодах применения перечисленных выше отраслевых стандартов *тип применения* обозначается буквой *кириллицы*, а именно:

В — для внутриобъектовой связи;

К — для короткой межстанционной связи;

Д — для длинной межстанционной связи;

О — для очень длинной межстанционной связи;

С — для сверхдлинной межстанционной связи.

Коды оптических секций, а также соответствующие им длины волн, типы применяемого волокна и примерные значения протяженностей секций согласно рекомендациям G.957 и G.691 приведены в табл. 4.1-4.3 соответственно.

Таблица 4.1 – Коды и параметры оптических секций по рекомендациям G.957

Параметр	Коды применения					
	I-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2	L-1.3
	I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3
	I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3
Номинальная длина волны, нм	1310	1310	1550	1310	1550	1550
Тип волокна ¹	G.652			G.652	G.653	
Протяженность ² , км	2	15	15	40	80	80

¹ Не исключается применение волокна G.655.

² Ориентировочное значение.

Волоконно-оптические системы на основе СЦИ обладают универсальными возможностями и обеспечивают так называемую *поперечную совместимость*, т.е. возможность использования оборудования различных производителей. Это привело к классификации *оптических стыков* —

интерфейсов, как и оптических секций, по коду применения и нормированию их параметров в опорных точках, показанных на рис. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Коды и параметры оптических секций по рекомендациям G.691

Параметр	Коды применения						
	S-64.1	S-64.2	S-64.3	L-64.5	L-64.1	L-64.2	L-64.3
Номинальная длина волны, нм	1310	1550			1310	1550	
Тип волокна	G.652		G.653	G.655	G.652		G.653
Протяженность ¹ , км	20	40			80		80

¹ Ориентировочное значение.

Таблица 4.3 – Коды и параметры оптических секций по рекомендациям G.691

Параметр	Коды применения				
	V-1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3
	-	V-16.2	V-16.3	U-16.2	U-16.3
	-	V-64.2	V-64.3	-	-
Номинальная длина волны, нм	1310			1550	
Тип волокна	G.652		G.653	G.652	G.653
Протяженность ¹ , км	60	120		160	

¹ Ориентировочное значение.

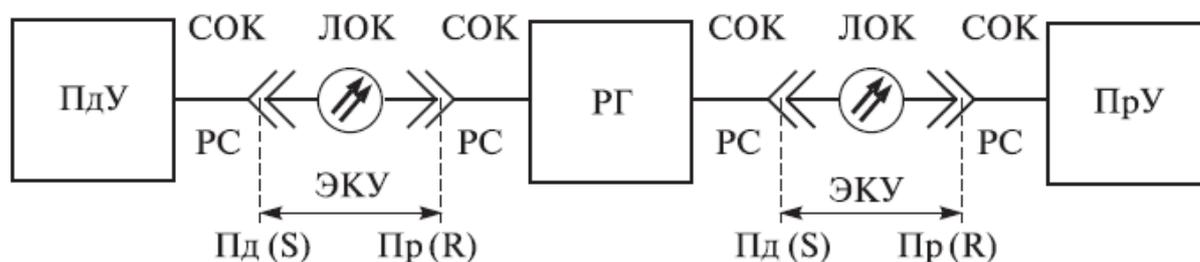


Рисунок 4.2 - Опорные точки нормирования стыков СЦИ без оптических усилителей: Пд (S) и Пр (R)



Рисунок 4.3 - Опорные точки нормирования стыков СЦИ с оптическими усилителями: ГПд (MPI-S), ГПр (MPI-R), Пд' (S'), Пр'(R')

На этих рисунках использованы следующие обозначения элементов и сокращения:

ПдУ – передающее устройство (передатчик);

ПрУ – приемное устройство (приемник);

СОК – стационарный оптический кабель;

ЛОК – линейный оптический кабель;

РС – регенератор;

ЭКУ – элементарный кабельный участок;

ОУпд – оптический усилитель мощности на передаче;

ОУпр – оптический усилитель на приеме;

ОУпм – оптический усилитель промежуточный (линейный);

РС – разъемный соединитель;

ПдОУ – передатчик с оптическим усилителем;

ПрОУ – приемник с оптическим усилителем.

Термин «главный оптический тракт» означает, что вспомогательные оптические тракты, соединяющие ПдУ с ОУпд и ОУпр с ПрУ с помощью стационарных оптических кабелей, а также все другие стационарные оптические кабели и разъемные соединители выносятся за границы опорных точек нормирования. Обозначения в скобках соответствуют принятым в рекомендациях G.957 и G.691 сокращениям: S (Source), R (Receiver), MPI-S (Main Path Interface-S) и MPI-R (Main Path Interface-R).

К основным параметрам *оптических стыков* согласно рекомендации G.957 относятся:

- рабочий диапазон длин волн источника, который определяет максимально допустимый диапазон длин волн источника излучения, в пределах которого может быть выбрана длина волны источника; приемник должен иметь минимальный диапазон рабочих длин волн, который соответствует максимальному допустимому диапазону длин волн источника; для каждого кода применения он выбирается исходя из типа оптического кабеля, характеристик источника излучения, суммарного затухания и суммарной дисперсии (материальной и волноводной) оптического тракта между опорными точками передатчика Пд (S) и приемника Пр (R); *для передатчика* (точка Пд или S):

- тип источника излучения, который выбирается в зависимости от кода применения и параметров оптического волокна;

- максимальная ширина спектра излучения, которая определяется на уровне – 20 дБ относительно амплитуды на центральной длине волны источника излучения;

- максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения; среднеквадратическая ширина спектра излучения — стандартное отклонение спектрального распределения при нормальных условиях эксплуатации;

- уровень излучаемой мощности — уровень средней мощности псевдослучайного цифрового оптического сигнала в точке Пд (S) передатчика; значения этого параметра ограничиваются снизу и сверху соответственно минимальным уровнем и максимальным уровнем; *для оптического тракта* (между точками Пд и Пр или S и R):

- максимальное значение перекрываемого затухания, которое определяется как разность между минимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и чувствительностью приемника с учетом наихудшего значения суммарных потерь между точками Пд (S) и Пр (R);

- минимальное значение перекрываемого затухания, которое определяется как разность между максимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и уровнем перегрузки приемника (минимальная перегрузка) с

учетом наименьшего значения суммарных потерь между точками Пд (S) и Пр (R) при заданном коэффициенте ошибки;

- диапазон перекрываемого затухания, который определяется как диапазон от минимального до максимального значений затуханий оптического тракта между точками Пд (S) и Пр (R);

- максимальная дисперсия, которая определяется как суммарная допустимая величина хроматической (волноводной и материальной) дисперсии волокна оптического кабеля, для которой выполняется требование к протяженности оптического тракта;

- максимальные дополнительные потери оптического тракта, величина которых определяется как максимальное значение снижения перекрываемого затухания из-за влияния ухудшающих факторов (межсимвольная интерференция, отражения, изменение длины волны передатчика и др.); для приемника (точка Пр или R):

- максимальная чувствительность, которая определяется как минимальный уровень средней мощности псевдослучайного цифрового оптического сигнала в точке Пр (R) приемника, при котором обеспечивается коэффициент ошибки не больше заданной величины;

- минимальная перегрузка, которая определяется как максимально допустимый уровень средней мощности принимаемого сигнала в точке Пр (R) приемника, при котором обеспечивается коэффициент ошибки не больше заданной величины.

Параметры оптических стыков для всех кодов применения определяются для линейного кода оптического сигнала NRZ со скремблированием.

Значения основных параметров оптических интерфейсов (стыков) рекомендации G.957 (ОСТ 45.104) соответственно для STM-1, STM-4 и STM-16 приведены в табл. 4.4-4.6.

Таблица 4.4 – Параметры оптических интерфейсов STM-1

Параметр	Код применения											
	1-1		S-1.1		S-1.2		L-1.1		L-1.2		L-1.3	
Рабочий диапазон длин волн, нм	1260...1360		1261...1360		1430...1576		1430...1580		1280...1335		1480...1580	
										1534...1566		1480...1580
										1523...1577		
	<i>Параметры передатчика в эталонной точке S</i>											
Тип источника	MLM ¹	LED ²	MLM	SLM ³	SLM	MLM	SLM	SLM	MLM	SLM		
Максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения, нм	14	80	7,7	2,5	-	4	-	-	3/2,5	-		
Максимальная ширина спектра на уровне -20 дБ, нм	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-		1
Уровень излучаемой мощности, дБм:												
максимальный						-8						
минимальный						-15						
						0						
						5						
	<i>Параметры оптического тракта между точками S и R</i>											
Диапазон допустимых затуханий, дБ	0...7		0...12				10...28					
Максимальная дисперсия, пс/нм	18	25	96	296	н/п ⁴	246	н/п	н/п	246/296	н/п		
Максимальные дополнительные потери оптического тракта, дБ	1											
	<i>Параметры приемника в эталонной точке R</i>											
Максимальная чувствительность ⁶ , дБм	-23		-28				-34					
Минимальная перегрузка, дБм	-8					-10						

Таблица 4.5 – Параметры оптических интерфейсов STM-4

Параметр	Код применения											
	1-4		S-4.1		S-4.2		L-4.1		L-4.2		L-4.3	
Рабочий диапазон длин волн, нм	1261...1360		1293...1334		1430...1580		1280...1335		1280...1335		1480...1580	
			1274...1356				1296...1330				1480...1580	
	<i>Параметры передатчика в эталонной точке S</i>											
Тип источника	MLM	LED	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	SLM	SLM	SLM		
Максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения, нм	14,5	35	4/2,5	-	2,0/1,7	-	-	-	-	-		
Максимальная ширина спектра на уровне -20 дБ, нм	-	-	-	1	-	1	<1	1	<1	1		
Уровень излучаемой мощности, дБм:												
максимальный	8	-8	-8	-8	+2	+2	+2	+2	+2	+2		
минимальный	15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-3		
	<i>Параметры оптического тракта между точками S и R</i>											
Диапазон допустимых затуханий, дБ	0-7		0-12		0-12		10-24		10-24		10-24	
Максимальная дисперсия, пс/нм	13	14	46/74	н/п	92/109	н/п	1600	1	н/п	1	н/п	
Максимальные дополнительные потери оптического тракта, дБ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	<i>Параметры приемника в эталонной точке R</i>											
Максимальная чувствительность ⁶ , дБм	-23		-28		-28		-28		-28		28	
Минимальная перегрузка, дБм	8		-8		-8		-8		-8		8	

Таблица 4.6 – Параметры оптических интерфейсов STM-16

Параметр	Код применения					
	1-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3
Рабочий диапазон длин волн, нм	1266... 1360	1250...1360	1430...1580	1280...1335	1500...1580	1500...1580
<i>Параметры передатчика в эталонной точке S</i>						
Тип источника	MLM	SLM	SLM	SLM	SLM	SLM
Максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения, нм	4	-	-	-	-	-
Максимальная ширина спектра на уровне -20 дБ, нм		1	<1	1	<1	<1
Уровень излучаемой мощности, дБм:						
максимальный	3	0	0	+3	+3	+3
минимальный	-10	-5	-5	-2	-2	-2
<i>Параметры оптического тракта между точками S и R</i>						
Диапазон допустимых затуханий, дБ	0...7	0...12	0...12	10...24	10...24	10...24
Максимальная дисперсия, пс/нм	12	н/п	420...800 ⁵	н/п	1200...1600 ⁵	450
Максимальные дополнительные потери оптического тракта, дБ	1	1			2	1
<i>Параметры приемника в эталонной точке R</i>						
Максимальная чувствительность ⁶ , дБм	-18	-18	-18	-27	-28	-27
Минимальная перегрузка, дБм	-3	0	0	-9	-9	-9

Примечания к табл. 4.4-4.6:

¹ MLM – лазерный диод с многими продольными модами;

² LED – светодиод

³ SLM – лазерный диод с одной продольной модой;

⁴ н/п – не применяется;

⁵ меньшее значение относится к нижней границе, а большее – к верхней границе диапазона длин волн;

⁶ коэффициент ошибок не больше 10^{-10} ; при коэффициенте ошибок 10^{-12} максимальную чувствительность следует повысить на 1 дБ.

Значения основных параметров оптических интерфейсов (стыков) ОСТ 45.178 с оптическими усилителями соответственно для STM-4, STM-16 и STM-64 приведены в табл. 4.7-4.9.

Таблица 4.7 – Параметры оптических интерфейсов STM-4 с ОУ

Параметр	Код применения					
	0-4.2 ¹ (V-4.2)	0-4.2 ² (V-4.2)	0-4.3 ¹ (V-4.3)	0-4.3 ² (V-4.3)	C-4.2 (U-4.2)	C-4.3 (U-4.3)
<i>Передатчик в точке ГПд</i>						
Рабочий диапазон длин волн, нм	1530...1565					
Уровень излучаемой мощности, дБм:						
максимальный	13	4	13	4	15	15
минимальный	10	0	10	0	12	12
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Отношение оптических сигнал/шум (ООСШ), не менее, дБ	3	3	3	3	20	20
<i>Оптический тракт между точками ГПд и ГПр, ГПд и Пр', Пд' и Пр', Пд' и ГПр'</i>						
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	22...33	22...33	22...33	22...33	33...44	33...44
Отношение оптических сигнал/шум в точке Пд ⁷ k-го ОУпм, не менее, дБ	3	3	3	3	н/п	н/п
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм	260	2400	260	400	3200	530
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	160	160	160	160	160	160
<i>Приемник в точке ГПр</i>						
Уровень чувствительности ⁴ , не более, дБм	-24	-34	-24	-34	-34	-33
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-9	-18	-9	-18	-18	-18
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ	1	1	1	1	2	1

Примечания:

¹ при применении только ОУпд;

² при применении только ОУпр;

³ определяется по формуле $ООСШ = 19+x+lgx$ в точке ГПд и по формуле $ООСШ = 19+x-k+10 lg(x/(k+1))$ в точке Пд' (k-го ОУпм), где x – число элементарных кабельных участков (при k промежуточных усилителях $x = k + 1$).

Таблица 4.8 – Параметры оптических интерфейсов STM-16 с ОУ

Параметр	Код применения					
	0-16.2 ¹ (V-16.2)	0-16.2 ² (V-16.2)	0-16.3 ¹ (V-16.3)	0-6.3 ² (V-16.3)	C-16.2 (U-16.2)	C-16.3 (U-16.3)
<i>Передатчик в точке ГПД</i>						
Рабочий диапазон длин волн, нм;	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565
Уровень излучаемой мощности, дБм:						
максимальный	13	4	13	4	15	15
минимальный	10	1	10	1	12	12
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Отношение оптических сигнал/шум (ООСШ), не менее, дБ	3	3	3	3	20	20
<i>Оптический тракт между точками ГПД и ГПр, ГПД и Пр', ПД' и Пр', ПД' и ГПр'</i>						
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	22...33	22...33	22...33	22...33	33...44	33...44
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм	260	2400	400	400	3200	530
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	40	40	40	40	40	40
Отношение оптических сигнал/шум в точке ПД' к-го ОУпм, не менее, дБ	3	3	3	3	н/п	н/п
<i>Приемник в точке ГПр</i>						
Уровень чувствительности ⁴ , не более, дБм	-24	-34	-24	-33	-34	-33
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-9	-18	-9	-18	-18	-18
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ;	1	2	1	1	2	1

Примечания:

¹ при применении только ОУпд;

² при применении только ОУпр;

³ определяется по формуле $ООСШ = 19 + x + 10 \lg x$ в точке ГПД и по формуле $ООСШ = 19 + x - k + 10 \lg[x/(k + 1)]$ в точке ПД' (к-го ОУпм), где x – число элементарных кабельных участков (при k промежуточных усилителях $x = k + 1$);

⁴ коэффициент ошибок не больше 10^{-12} .

Таблица 4.9 – Параметры оптических интерфейсов STM-64 с ОУ

Параметр	Код применения				
	К-64.1 (S-64.1)	К-64.2 (S-64.2)	К-64.3 (S-64.3)	Д-64.2а ^{1,2} (L-64.2а,с)	Д-64.2б ^{1,3} (L-64.2б)
<i>Передатчик в точке ГПД</i>					
Рабочий диапазон длин волн, нм;	1290...1330	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565
Уровень излучаемой мощности, дБм:					
максимальный	2	2	2	1	13
минимальный	-1	-1	-1	-2	10
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Отношение оптических сигнал/шум (ООСШ), не менее, дБ	н/п	н/п	н/п	5	5
<i>Оптический тракт между точками ГПД' и ГПр, ГПД и Пр', ПД' и Пр', ПД' и ГПр'</i>					
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	5...11	5...11	5...11	10...22	16...22
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм;	70	800	130	1600	1600
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	10	10	10	10	10
Отношение оптических сигнал/шум в точке ПД' к-го ОУпм, не менее, дБ	н/п	н/п	н/п	5	5
<i>Приемник в точке ГПр</i>					
Уровень чувствительности ⁴ , не более, дБм	-13	-14	13	-26	-14
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-3	-3	-3	-9	-3
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ;	1	2	1	2	2

Примечания:

¹ для уменьшения дисперсии в оптическом тракте для кода применения Д-64.2а используют пассивный компенсатор дисперсии или принудительное импульсное смещение центральной частоты, а для кода применения Д-64.2б – самомодуляцию фазы;

² при применении только ОУпр;

³ при применении только ОУпд;

⁴ коэффициент ошибок не больше 10^{-12} ;

⁵ определяется по формулам примечания ³ к табл. 4.7 и 4.8

По сравнению с интерфейсами G.957 интерфейсы G.691 (см. табл.4.7-4.9) имеют дополнительные параметры:

- отношение оптических сигнал/шум, который определяется как отношение средней мощности оптического сигнала к средней мощности оптического шума усиленной спонтанной эмиссии (ASE) в точках ГПд и Пд' в полосе частот 1 нм рабочего диапазона длин волн;
- поляризационная модовая дисперсия, которая определяется как допустимое значение разности времен распространения двух взаимоперпендикулярных поляризационных составляющих моды оптического сигнала в оптическом тракте (между точками ГПд и ГПр, ГПд и Пр', Пд' и Пр', Пд' и ГПр).

Основные параметры одномодовых оптических кабелей, соответствующих рекомендациям МСЭ-Т, приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10 – Параметры одномодовых оптических кабелей

Параметр ОК	Длина волны излучения, нм	Рекомендация МСЭ-Т			
		G.652	G.653	G.654	G.655
Километрическое затухание, не более, дБ/км	1310	0,5		Не используется	
	1550	0,4	0,35	0,22	0,35
Удельная хроматическая дисперсия, не более, пс/нм·км	1310	3,5		Не используется	
	1550	17	3,5	20	10

Самым распространенным в мире одномодовым волокном является волокно G.652, часто называемое стандартным (*Standard Fibre – SF*). Это волокно имеет четыре категории А, В, С и D с немного отличающимися параметрами. Поэтому оптические кабели с волокном SF различных производителей также могут отличаться по своим характеристикам причем, как правило, указываются значения параметров, улучшенных по сравнению с табл. 4.11. Аналогичное замечание можно сделать и в отношении волокна G.655.

Технические характеристики цифровых систем передачи СЦИ ряда зарубежных производителей для STM-1, STM-4 и STM-16 приведены в табл. 4.11-4.13 соответственно.

Таблица 4.11 – Технические характеристики цифровых систем передачи СЦИ для STM-1

Параметр	SMS-150 NEC	SMA-1 Siemens	1641 SM Alcatel	AXD155-2 Ericsson	TN-1X/S Nortel	FLX-150 Fujitsu
Уровень передачи, дБм	-5...0	-4...0	-15...0	-15...0	-15...0	-15...0
Длина волны, нм	1310/1550					
Чувствительность приемника при $K_{\text{ош}} = 10^{-10}$, дБм	-34	-34...-28	-38...-28	-34	-34	-34...-28
Затухание регенерационного участка: $A_{\text{мин}}, A_{\text{макс}}$, дБ	0...28	0...28	0...33	0...28	0...28	0...30
Уровень перегрузки приемника, дБм	0...-10	0...-8	-8...-10	-8...-10	0...-8	0...-8
Дисперсия $\sigma_{\text{п}}$, пс/нм	350...2500	350...2500	90...2500	100...5000	250...350	250...2500

Таблица 4.12 – Технические характеристики цифровых систем передачи СЦИ для STM-4

Параметр	SMS-600 NEC	SMA-4 Siemens	1651 SM Alcatel	AXD620-2 Ericsson	TN-4X Nortel	FLX-150/600 Fujitsu
Уровень передачи, дБм	-3...5	-15...2	-15...2	-15...2	-3...2	0...2
Длина волны, нм	1310/1550					
Чувствительность приемника при $K_{\text{ош}} = 10^{-10}$, дБм	-32,5	-35	-28	-30	-34...-32	-28
Затухание регенерационного участка: $A_{\text{мин}}, A_{\text{макс}}$, дБ	10...28	0...32	10...30	0...30	8...30	10...24
Уровень перегрузки приемника, дБм	-8	-8...-3	-8	-8...0	-6	-5
Дисперсия $\sigma_{\text{п}}$, пс/нм	1570	130...4000	300...3000	100...5000	250...3500	350

Таблица 4.13 – Технические характеристики цифровых систем передачи СЦИ для STM-16

Параметр	SMA-16 (Siemens)	1664 SM (Alcatel)	TN-16X (Nortel)
Уровень передачи, дБм	-3...2	-3...2	0...2
Длина волны, нм	1310/1550		
Чувствительность приемника при $K_{\text{ош}} = 10^{-10}$, дБм	-29...-36	-29,5...-27	-28...-26,5
Затухание регенерационного участка: $A_{\text{мин}}, A_{\text{макс}}$, дБ	0...27,5	0...27	20,5...41,7
Уровень перегрузки приемника, дБм	-6	-4	-10
Дисперсия $\sigma_{\text{п}}$, пс/нм	130...4000	300...3000	250...3500

На всех участках проектируемой ВОЛП следует применять оборудование одного и того же производителя во избежание проблем при разработке системы управления сетью. Синхронные мультиплексоры, устанавливаемые на разных концах ретрансляционного участка ВОЛП, должны комплектоваться платами оптического стыка с одним и тем же кодом применения. Оптические кабели предлагаются различными отечественными и зарубежными производителями и их выбор огромен. Основными отечественными производителями ОК являются ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания», ЗАО «Севкабель-Оптика», ЗАО «Саранскабель», АО НФ «Электропривод» и др.

В табл. 4.14 в качестве примера приведены некоторые типы и параметры кабелей рекомендации G.652 производства ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания».

Таблица 4.14 – Типы и параметры кабелей производства ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания» (СОКК)

Параметр	ОКЛ-01(02), ОКЛК-01(02)	ОКЛСт-01(02), ОКГТ-МТ
Длина волны, нм	1310	1550
Коэффициент затухания, дБ/км	0,36	0,22
Удельная дисперсия, пс/нм·км	3,5	18

ОКЛ-01(02) — оптический кабель линейный магистральный и внутризоновый с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня (стального троса), вокруг которого скручены оптические модули (ОМ) с гидрофобным заполнением и защитной оболочкой из полиэтилена (ПЭ). Для прокладки в канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах, в шахтах, а также внутри зданий.

ОКЛК-01(02) — оптический кабель линейный магистральный и внутризоновый с центральным профилированным элементом, армированным стеклопластиковым стержнем, в пазы которого уложены оптические волокна с гидрофобным заполнением в защитной оболочке ПЭ. Для прокладки на канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах, в грунтах всех категорий, через болота и водные переходы.

ОКЛСт-01(02) — оптический кабель линейный магистральный и внутризоновый с центральным стеклопластиковым стержнем или стальным тросом в полиэтиленовой оболочке. Силовые элементы: повив синтетических нитей либо две стальные проволоки, или два стеклопластиковых стержня. Броня: гофрированная стальная лента. Наружная оболочка: светостабилизированный полиэтилен или полихлорвинил (ПВХ). Для прокладки в канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах, в гравийно-песчаном грунте, наносных песках, тяжелых глинистых грунтах при опасности повреждения грызунами.

ОКГТ-МТ — оптический кабель линейный магистральный и внутризоновый, встроенный в защитный трос. ОМ представляют центральную пластмассовую трубку с ОВ, заполненную гидрофобным компаундом по всей длине. На ОМ накладывается внутренний повив из круглых стальных

оцинкованных проволок, затем алюминиевая оболочка и наружный повив чередующихся круглых стальных проволок с алюминиевым покрытием и проволок из алюминиевого сплава. Для подвески на ЛЭП путем встраивания в грозозащитный трос. Во всех кабелях СОКК используется ОВ G.652 фирмы «Корнинг». Количество ОВ от 4 до 32. Строительная длина ОК не менее 2 км.

4.3 Определение оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендаций МСЭ-Т

Рассмотрим методику выбора оптических интерфейсов уровня STM-4 на примере условной схемы организации связи (рис. 4.4).

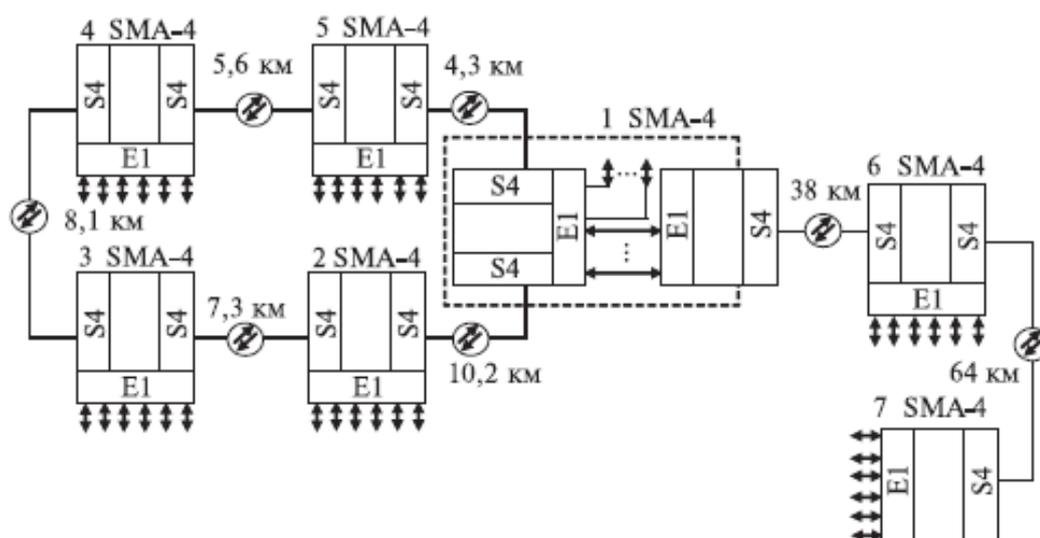


Рисунок 4.4 - Схема организации связи с использованием сетевых структур «кольцо» и «линейная последовательная цепь»

На этой схеме пункты 1, 6 и 7 соединяются последовательной линейной цепью, а пункты 1, 2, 3, 4 и 5 соединяются кольцом. Расстояния между пунктами сводим в табл. 5.15 в которой указаны соответствующие этим расстояниям и предварительно выбранные коды применения (см. табл. 4.15).

Таблица 4.15 – Расстояние между пунктами

Пункты	1-2	2-3	3-4	4-5	1-5	1-6	6-7
Расстояние, км	10,2	7,3	8.1	5,6	4,3	38	64
Код применения	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	L-4.1	L-4.2

При выборе кода применения учтено, что самыми распространенными, доступными и наиболее экономичными являются ОК с волокнами рекомендации G.652.

Исходя из параметров оптического интерфейса STM-4 и параметров оптического кабеля, выполним оценку применимости выбранных кодов. С этой целью для каждого выбранного кода применения необходимо определить максимальную и минимальную протяженности регенерационных секций (длина участка регенерации).

Максимальная $L_{\text{макс}_a}$ и минимальная $L_{\text{мин}_a}$ протяженности, определяемые допустимыми потерями между точками S и R , находятся по формулам:

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a};$$
$$L_{\text{мин}_a} = \frac{A_{\text{мин}}}{a};$$

где $A_{\text{макс}}$ и $A_{\text{мин}}$ – максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания соответственно; a – километрическое затухание (коэффициент затухания) в оптическом кабеле.

Значения $A_{\text{макс}}$ и $A_{\text{мин}}$ для данного примера берутся из табл.5.5, а величина a – из табл. 4.10. На основании этих таблиц имеем:

$A_{\text{макс}} = 12$ дБ, $A_{\text{мин}} = 0$ дБ и $a = 0,5$ дБ/км для ОК рекомендации G.652 на длине волны 1310 нм (код применения S-4.1);

$A_{\text{макс}} = 24$ дБ, $A_{\text{мин}} = 12$ дБ и $a = 0,5$ дБ/км для ОК рекомендации G.652 на длине волны 1310 нм (код применения L-4.1);

$A_{\text{макс}} = 24$ дБ, $A_{\text{мин}} = 12$ дБ и $a = 0,4$ дБ/км для ОК рекомендации G.652 на длине волны 1550 нм (код применения L-4.2).

Далее по формуле (4.1) находим максимальную протяженность регенерационной секции выбранных интерфейсов:

для кода применения S-4.1

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a} = \frac{12}{0,5} = 24 \text{ км};$$

для кода применения L-4.1

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a} = \frac{24}{0,5} = 48 \text{ км};$$

для кода применения L-4.2

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a} = \frac{24}{0,4} = 60 \text{ км}.$$

Минимальная протяженность регенерационной секции выбранных интерфейсов определяется по формуле (4.2):

для кода применения S-4.1

$$L_{\text{мин}_a} = \frac{A_{\text{мин}}}{a} = \frac{0}{0,5} = 0 \text{ км};$$

для кода применения L-4.1

$$L_{\text{мин}_a} = \frac{A_{\text{мин}}}{a} = \frac{12}{0,5} = 24 \text{ км};$$

для кода применения L-4.2

$$L_{\text{мин}_a} = \frac{A_{\text{мин}}}{a} = \frac{12}{0,4} = 30 \text{ км}.$$

Выбранный интерфейс L-4.2, как следует из табл. 4.5, на участке 6–7 не удовлетворяет требованию по максимальной протяженности. Допустимую величину километрического затухания $a_{\text{доп}}$ для такой секции определим из уравнения $L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a}$, решив его относительно a . Для значений $A_{\text{макс}} = 24$ дБ и $L_{\text{макс}} = 64$ км, получаем

$$a_{\text{доп}} = \frac{A_{\text{макс}}}{L_{\text{макс}}} = \frac{24}{64} = 0,375 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}.$$

Километрическое затухания меньше $a_{\text{доп}}$ имеет улучшенное ОВ рекомендации G.652 (табл. 4.14), которое и следует применить.

С другой стороны, максимальная длина оптической секции зависит от дисперсии ОВ и определяется по формуле:

$$L_{\text{макс}_\sigma} = E \cdot 10^6 / (BD_{\text{хр}} \sigma_\lambda),$$

где B – скорость передачи, Мбит/с; $D_{\text{хр}}$ – удельная хроматическая дисперсия ОВ, пс/нм·км; σ_λ – среднеквадратическая ширина спектра (СШС) источника излучения, нм.

Если ширина спектра определена на уровне -20 дБ ($\Delta\lambda_{-20}$), то СШС

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_{-20}}{6,07} .$$

Величина E в принимается равной:

- 0,306 для СД и одномодовых лазеров (дополнительные потери в тракте 1 дБ);
- 0,491 для тракта STM-16 (дополнительные потери в тракте 2 дБ);
- 0,115 для многомодовых лазеров (учет шума разделения мод);

Для кода применения S-4.1 (источник излучения MLM: $E = 0,115$, $\sigma_{\lambda} = 4$ нм; $B = 622,08$ Мбит/с, $D_{хр} = 3,5$ пс/нм·км) имеем

$$L_{\text{макс}\sigma} = \frac{0,115 \cdot 10^6}{622,08 \cdot 3,5 \cdot 4} \approx 13,2 \text{ км.}$$

Для кода применения L-4.1 (источник излучения SLM: $E = 0,306$, $\Delta\lambda_{-20} = 1$ нм; $B = 622,08$ Мбит/с, $D_{хр} = 3,5$ пс/нм·км) имеем

$$L_{\text{макс}\sigma} = \frac{0,306 \cdot 10^6 \cdot 6,07}{622,08 \cdot 3,5 \cdot 1} \approx 853 \text{ км.}$$

Для кода применения L-4.2 (источник излучения SLM: $E = 0,306$, $\Delta\lambda_{-20} = 1$ нм; $B = 622,08$ Мбит/с, $D_{хр} = 18$ пс/нм·км) имеем

$$L_{\text{макс}\sigma} = \frac{0,306 \cdot 10^6 \cdot 6,07}{622,08 \cdot 18 \cdot 1} \approx 165,9 \text{ км.}$$

Следовательно, для всех участков проектируемой сетевой структуры можно применить оптический кабель с ОВ рекомендации G.652. Выбор системы передачи можно выполнить, руководствуясь основными техническими данными оборудования СЦИ, представленными в табл. 4.12. Основные критерии в выборе оборудования: скорость передачи линейных интерфейсов, дальность передачи, разнообразие пользовательских интерфейсов, способов резервирования, интерфейсы к системам и сети управления TMN, наличие дополнительных интерфейсов для стационарной сигнализации и пр. Окончательно решение о выборе типа аппаратуры и ОК выносится после проведения экономических расчетов.

4.4 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети

Рассмотрим подробно вариант курсового проекта, где необходимо спроектировать участок транспортной сети, который соединит города Москва и Чебоксары. На данном участке сети, построенного по топологии точка-точка предполагается произвести процедуру ввода-вывода по два потока уровня STM-16 в городах Владимир и Нижний Новгород. Потребителями проектируемой сети связи будут предприятия, население, также часть каналов будет предоставляться для передачи данных, телевизионных сигналов, сигналов телеконтроля в медицинских учреждениях и сдаваться в аренду коммерческим операторам связи. Транспортная сеть должна быть ориентирована на любой вид пользовательской информации, как то сигналы PDH, ATM, Frame Relay, Ethernet.

Кроме того, спроектированный участок может являться началом, к проектированию и построению мощной, высокоскоростной магистральной транспортной сети связывающей европейскую часть России с регионами дальнего востока и государств Азии.

Одной из особенностей данной сети является использование технологии волнового мультиплексирования. Именно эта технология, по мнению многих экспертов наиболее перспективна и уже сегодня позволяет достичь рекордных суммарных скоростей передачи по одному оптическому волокну. Кроме этого, технология волнового мультиплексирования позволяет наиболее полно использовать огромную пропускную способность оптического волокна.

В данном случае предполагается использовать систему волнового мультиплексирования Lambda Driver 1600.

Система Lambda Driver 1600 обеспечивает передачу до 16 независимых потоков информации скоростью до 2,5 Гбит/с каждый в полнодуплексном режиме по одной паре оптических волокон. Максимальная пропускная способность системы достигает 40 Гбит/с. Система Lambda Driver обеспечивает прозрачную передачу нескольких независимых потоков данных по оптическому волокну. Lambda Driver позволяет одновременно мультиплексировать по длинам

волн потоки SDH, ATM, Fast/Gigabit Ethernet, Fibre Channel и др. Имеется два вида шасси Lambda Driver (LD800 и LD1600). Оба вида шасси Lambda Driver используют одни и те же универсальные транспондеры. Управление и мониторинг системой Lambda Driver осуществляется локально через порт RS232 (DB9) или дистанционно по протоколам SNMP или Telnet через порт Ethernet 10/100 Мбит/с (RJ-45). Удаленное управление осуществляется через специальный канал управления (OSC), который передается вместе с данными WDM/DWDM по тому же оптическому кабелю. Каждый модуль мультиплексора/демультиплексора DWDM имеет интерфейс к системе мониторинга оптического канала. Типичной конфигурацией сети при использовании Lambda Driver является топология “точка-точка”. Реализация кольцевой топологии требует использования модулей мультиплексоров ввода/вывода в каждом из узлов кольца.

Среди модулей для платформы LD800 – мультиплексоры, демультиплексоры и OADM для 1, 2, 4 или 8 длин волн. Такая гибкость дает операторам возможность снизить начальные вложения – сначала приобрести систему, работающую с несколькими длинами волн, а затем модернизировать ее по мере необходимости.

В качестве системы передачи будет использоваться оборудование SDH (СЦИ) компании «Lucent Technologies». Марка аппаратуры - WaveStar® ADM 16/1. Данная система передачи 3-го поколения с высокой пропускной способностью, может мультиплексировать стандартные скорости PDH и SDH до более высоких уровней, вплоть до 2,5 Гбит/с (STM-16).

На проектируемом участке транспортной сети расстояние между городами Москва и Чебоксары составляет 674 км. В современных волоконно-оптических сетях длина регенерационного участка составляет 700-1000 км. То есть, организация связи между Москвой и Чебоксарами возможна без промежуточной регенерации сигнала. Это позволяет обойтись без процедуры оптоэлектронного преобразования, значительно усложняющего и удорожающего сеть. Затухание, вносимое кабелем и другими элементами предполагается компенсировать усилителями на волокне легированного эрбием (EDFA). Несмотря на позднее

рождение, EDFA первыми проникают на телекоммуникационный рынок и на сегодняшний день доминируют на нём. Оптический усилитель имеет три существенных преимущества перед регенератором. Во-первых, оптический усилитель конструктивно проще. Во-вторых, оптический усилитель в отличие от регенератора не привязан к протоколу или скорости передачи и может усиливать входной сигнал любого формата. В-третьих, оптический усилитель способен одновременно усиливать большое число независимых спектрально разделённых каналов, в то время как регенератор может обрабатывать только один канал, одну длину волны. Перечисленные преимущества оптического усилителя настолько значительны, что позволяют мириться с главным недостатком – дополнительным шумом, вносимым усилителем.

При проектировании участка сети учитывались многие экономические факторы. Конечно, оптимальной стратегией было бы как можно частое размещение усилителей и соответствующее уменьшение их коэффициентов усиления. Цена, однако, диктует противоположную стратегию. На практике экономически не выгодно размещать оптические усилители близко, так как каждый узел, в котором находится оптический усилитель, требует определённой инфраструктуры – наличие источника питания, помещения, защищённости узла, обслуживающего персонала. Так характерные расстояния между усилителями составляют 40 -100 км и более.

При выборе места установки учитывалось, что бы каждый усилитель находился вблизи городской зоны, так как для его работы требуется наличие источника питания, а также в случае выхода его из строя, быстрому прибытию для его восстановления работоспособности обслуживающего персонала.

Кроме этого, трасса прокладки выбиралась с учётом топографических трудностей, обходя многие преграды и проложенная главным образом вдоль автомагистраль, чем повышается её доступность для обслуживания и скорость строительства.

В курсовом проекте, для повышения надёжности и качества передачи предусмотрен метод резервирования канала 1+1. Архитектура 1+1 является такой архитектурой, в которой основной блок подключается то к рабочему то к

резервному каналу, тем самым, обеспечивая более высокое качество передачи. Кроме того, в последующем, при построении между городами Москва и Чебоксары нового участка транспортной сети возможно организация резервного направления передачи, тем самым значительно увеличить надёжность ВОЛС. При этом необходимо учесть, что выходная мощность системы волнового мультиплексирования с резервированием несколько ниже, чем без резервирования $P_{ПЕР} = -5$ (дБм).

Усиление оптического сигнала производится с помощью оптического усилителя на волокне легированного эрбием EDFA компании Lucent. Чувствительность усилителя в режиме линейного усилителя и в режиме предусилителя

$$P_{ПРМИН} = -30 \text{ дБм.}$$

В связи с деградацией (ухудшением во времени) характеристик оптического кабеля, и аппаратуры необходимо ввести эксплуатационный запас для уровня мощности приёма усилителя EDFA. При проектировании длин усилительных участков учтенный эксплуатационный запас $A_{ЗАП} = 2$ (дБ).

4.5 Проектирование участка транспортной сети Москва - Чебоксары

4.5.1 Проектирование прямого направления (Москва – Чебоксары)

Энергетический потенциал усилительного участка с учётом эксплуатационного запаса определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_i = p_{\text{ПРМИН}} + p_{\text{ПЕР},i-1} - A_{\text{ЗАП}}, \quad (4.1)$$

где i – номер усилительного участка

Выходная мощность системы Lambda Driver 1600 с учётом резервирования

$$p_{\text{ПЕР}} = -5 \text{ (дБм)}.$$

Чувствительность EDFA в режиме линейного усилителя

$$p_{\text{ПРМИН}} = -30 \text{ (дБм)}.$$

Соответственно энергетический потенциал первого усилительного участка

$$\mathcal{E}_1 = p_{\text{ПЕР}} - p_{\text{ПРМИН}} - A_{\text{ЗАП}} \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_1 = -5 - (-30) - 2 = 23 \text{ (дБм)}.$$

Максимальное расстояние усилительного участка определяется по формуле:

$$L_{\text{УСМАКС},i} = \frac{\mathcal{E}_i - A_p \cdot n_p}{\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}}. \quad (4.2)$$

Считаем, что разъёмные соединения установлены только в местах подключения мультиплексоров волнового уплотнения и ввода-вывода каналов.

Соответственно максимальное расстояние первого усилительного участка

$$L_{\text{УСМАКС},1} = \frac{\mathcal{E}_1 - A_p \cdot n_p}{\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}};$$
$$L_{\text{УСМАКС},1} = \frac{23 - 0,5 \cdot 1}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ (км)}.$$

Исходя из максимальной длины первого усилительного участка, для установки первого усилителя EDFA наиболее оптимально выбрать н.п.

(населённый пункт) Электрогорск. Расстояние от Москвы до н.п. Электрогорск

$L_{yc.1} = 72$ км.

Затухание, вносимое усилительным участком, определяется по формуле:

$$A_i = L_{yc.i} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P. \quad (4.3)$$

То есть, вносимое затухание первым усилительным участком

$$A_1 = L_{yc1} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_1 = 72 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 1 = 22,4 \text{ (дБ)}.$$

Уровень мощности на выходе i -того участка:

$$P_{ПР.i} = P_{ПЕР.i-1} - A_i. \quad (4.4)$$

Данное значение для первого участка

$$P_{ПР1} = P_{ПЕР} - A_1;$$

$$P_{ПР1} = -5 - 22,4 = -27,4 \text{ (дБм)}.$$

Для определения коэффициента усиления усилителя EDFA, зависящего от мощности входного сигнала будем пользоваться аппроксимирующим полиномом, полученным с помощью метода наименьших квадратов. Аппроксимирующий полином имеет вид (вывод данной функции представлен в разделе (2.4.):

$$q = 16 - 0,816 \cdot P_{ПР} - 0,0116 \cdot P_{ПР}^2.$$

Таким образом, при $P_{ПР1} = -27,4$ (дБм)

$$q_1 = 16 + 0,816 \cdot 27,4 - 0,0116 \cdot (-27,4)^2 = 29,5 \text{ (дБ)}.$$

(Отметим, что погрешность при определении значения q , составляет 0,1 дБ.)

Мощность на выходе i -того усилителя EDFA (или на входе $i+1$ усилительного участка)

$$P_{ПЕР.i} = P_{ПР.i} + q_i. \quad (4.6)$$

Применимо к первому усилительному участку

$$P_{ПЕР1} = P_{ПР1} + q_1;$$

$$P_{ПЕР1} = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ (дБм)}.$$

Аналогично, пользуясь формулами (4.1) - (4.6) произведём расчет для следующих усилительных участков

$$\mathcal{E}_2 = P_{ПРМИН} + P_{ПЕР1} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_2 = 30 + 2,1 - 2 = 30,1 \text{ (дБм)}.$$

$$L_{УСМАКС2} = \frac{\mathcal{E}_2 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС2} = \frac{30,1 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 101 \text{ (км)}.$$

Место расположения второго усилительного пункта выберем н.п. Хрястово, расстояние, до которого от н.п. Электрогорск

$$L_{УС2} = 99 \text{ (км)};$$

$$A_2 = L_{УС2} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_2 = 99 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР2} = P_{ПЕР1} - A_2;$$

$$P_{ПР2} = 2,1 - 29,5 = -27,4 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР2} = -27,4$ (дБм);

$$q_2 = 16 + 0,816 \cdot 27,4 - 0,0116 \cdot (-27,4)^2 = 29,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР2} = P_{ПР2} + q_2;$$

$$P_{ПЕР2} = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ (дБм)}.$$

В г. Владимир необходимо установить оптический мультиплексор ввода-вывода (OADM) вносящий затухание

$$A_{OADM} = 1,5 \cdot \log_2 8 = 4,5 \text{ (дБ)}.$$

Данная методика расчёта потерь приведена в [7]. Также необходимо учесть, соответствует ли уровень сигнала, поступающий на вход OADM1 динамическому диапазону приёмника равного от -3 дБм до -20 дБм. В случае если уровень сигнала окажется выше динамического диапазона, то придётся

установить аттенюатор, вносящий необходимое затухание, в противном случае – предусилитель.

Определим мощность на выходе OADM1

$$L'_{УС3} = 20 \quad (\text{км}).$$

(Величины A'_3 , $L'_{УС3}$ - относятся к участку Хрястово – Владимир. A''_3 , $L''_{УС3}$ - к участку Владимир – Дмитриево. Полная длина усилительного участка составляет $L_{УС3} = L'_{УС3} + L''_{УС3}$)

$$A'_3 = L'_{УС3} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A'_3 = 20 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 0,5 \cdot 2 = 5,3 \quad (\text{дБ});$$

$$P'_{ПР3} = P_{ПЕР2} - A'_3;$$

$$P'_{ПР2} = 2,1 - 5,3 = -3,2 \quad (\text{дБм}).$$

Полученная величина входного уровня полностью соответствует динамическому диапазону приёмника. Значит, ни каких дополнительных устройств устанавливать не потребуется. С учётом затухания, вносимым OADM, определим $P'_{ПЕР2}$.

$$P'_{ПЕР2} = P'_{ПР2} - A_{OADM};$$

$$P'_{ПЕР2} = -3,2 - 4,5 = -7,7 \quad (\text{дБ});$$

$$\mathcal{E}'_3 = P_{ПРМИН} + P'_{ПЕР2} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}'_3 = 30 - 7,7 - 2 = 20,3 \quad (\text{дБм});$$

$$L''_{УСМАКС3} = \frac{\mathcal{E}'_3 - A_P \cdot n_P + L'_{УС3} \cdot \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L''_{УСМАКС3} = \frac{20,3 - 0,5 \cdot 2 - 20 \cdot \frac{1,56 \cdot 18}{340}}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 59 \quad (\text{км}).$$

Место расположения третьего усилительного пункта выберем в н.п. Дмитриево, расстояние, до которого от г. Владимир

$$L''_{УС3} = 59 \text{ (км)}.$$

Таким образом, общая длина третьего усилительного участка

$$L_{УС3} = L'_{УС3} + L''_{УС3};$$

$$L_{УС3} = 20 + 59 = 79 \text{ (км)};$$

$$A''_3 = L''_{УС3} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} \right) - L_{УС3} \cdot \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} + A_P \cdot n_P;$$

$$A''_3 = 20 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 79 \cdot \frac{1,56 \cdot 18}{340} + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР3} = P'_{ПЕР2} - A''_3;$$

$$P_{ПР3} = -7,7 - 20,3 = -28 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР3} = -28$ (дБм);

$$q_3 = 16 + 0,816 \cdot 28 - 0,0116 \cdot (-28)^2 = 29,6 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР3} = P_{ПР3} + q_3;$$

$$P_{ПЕР3} = -28 + 29,6 = 1,6 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_4 = P_{ПРМИН} + P_{ПЕР3} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_4 = 30 + 1,6 - 2 = 29,6 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС4} = \frac{\mathcal{E}_4 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС4} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 99 \text{ (км)}.$$

Место расположения четвертого усилительного пункта выберем н.п. Гороховец, расстояние, до которого от н.п. Дмитриево

$$L_{УС4} = 98 \text{ (км)};$$

$$A_4 = L_{УС4} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_4 = 95 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} - \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,2 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР4} = P_{ПЕР3} - A_4;$$

$$P_{\text{ПР4}} = 1,6 - 29,2 = 27,6 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{\text{ПР4}} = -27,6$ (дБм);

$$q_4 = 16 + 0,816 \cdot 27,6 - 0,0116 \cdot (-27,6)^2 = 29,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПЕР4}} = P_{\text{ПР4}} + q_4;$$

$$P_{\text{ПЕР4}} = -27,6 + 29,5 = 1,9 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_5 = P_{\text{ПРМИН}} + P_{\text{ПЕР4}} - A_{\text{ЗАП}};$$

$$\mathcal{E}_5 = 30 + 1,6 - 2 = 29,4 \text{ (дБм)};$$

$$L_{\text{УСМАКС}} = \frac{\mathcal{E}_5 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{\text{УСМАКС}} = \frac{29,4 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 95 \text{ (км)}.$$

Следующий усилитель EDFA разместим в г. Нижний Новгород расстояние, до которого

$$L_{\text{УС5}} = 65 \text{ (км)}.$$

Кроме того, в этом городе необходимо произвести процедуру ввода-вывода двух потоков STM – 16.

$$A_5 = L_{\text{УС5}} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_5 = 65 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ (дБ)};$$

$$P'_{\text{ПР5}} = P_{\text{ПЕР4}} - A_5;$$

$$P'_{\text{ПР5}} = 1,9 - 20,3 = -18,4 \text{ (дБм)}.$$

Данный входной уровень мощности соответствует минимальной чувствительности приёмного модуля OADM. С учётом затухания, вносимым OADM, определим $P_{\text{ПР5}}$.

$$P_{\text{ПР5}} = P'_{\text{ПР5}} - A_{\text{OADM}};$$

$$P_{\text{ПР5}} = -18,4 - 4,5 = -22,9 \text{ (дБ)}.$$

В этом же городе разместим усилитель EDFA

При $p_{ПР5} = -22,9$ (дБм);

$$q_5 = 16 + 0,816 \cdot 22,9 - 0,0116 \cdot (-22,9)^2 = 28,5 \text{ (дБ)};$$

$$p_{ПЕР5} = -22,9 + 28,9 = 5,6 \text{ (дБ)};$$

$$\mathcal{E}_6 = p_{ПРМИН} + p_{ПЕР5} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_6 = 30 + 5,6 - 2 = 33,6 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС6} = \frac{\mathcal{E}_6 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС6} = \frac{33,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 109 \text{ (км)}.$$

Место расположения шестого усилительного пункта выберем н.п. Белозериха расстояние, до которого от г. Нижний Новгород

$$L_{УС6} = 105 \text{ (км)};$$

$$A_6 = L_{УС6} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_6 = 105 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 32,5 \text{ (дБ)};$$

$$p_{ПР6} = p_{ПЕР5} - A_6;$$

$$p_{ПР6} = 5,6 - 32,5 = -26,9 \text{ (дБм)}.$$

При $p_{ПР6} = -26,9$ (дБм);

$$q_6 = 16 + 0,816 \cdot 26,9 - 0,0116 \cdot (-26,9)^2 = 29,4 \text{ (дБ)};$$

$$p_{ПЕР6} = p_{ПР6} + q_6;$$

$$p_{ПЕР6} = -26,9 + 29,4 = 2,5 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_7 = p_{ПРМИН} + p_{ПЕР6} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_7 = 30 + 2,5 - 2 = 30,5 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС7} = \frac{\mathcal{E}_7 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС7} = \frac{30,5 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 102 \text{ (км)}.$$

Место расположения седьмого усилительного пункта выберем н.п. Юнга расстояние до которого

$$L_{УС7} = 98 \text{ (км)};$$

$$A_7 = L_{УС7} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_7 = 98 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,2 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР7} = P_{ПЕР6} - A_7;$$

$$P_{ПР7} = 2,5 - 29,2 = -26,7 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР7} = -26,7$ (дБм);

$$q_7 = 16 + 0,816 \cdot 26,7 - 0,0116 \cdot (-26,7)^2 = 29,4 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР7} = P_{ПР7} + q_7;$$

$$P_{ПЕР7} = -26,7 + 29,4 = 2,7 \text{ (дБм)}.$$

Определим уровень сигнала в г. Чебоксары

$$L_{УС8} = 58 \text{ (км)};$$

$$A_8 = L_{УС8} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_8 = 58 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,58 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 1 = 18,3 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР8} = P_{ПЕР7} - A_8;$$

$$P_{ПР8} = 2,7 - 18,3 = -15,4 \text{ (дБм)}.$$

Данный уровень мощности соответствует диапазону приёмного модуля аппаратуры Lambda Driver 1600. Поэтому в г. Чебоксары нет необходимости ставить предусилитель.

Подводя итоги, видим, что для построения прямого направления участка сети, понадобится 7 усилителей EDFA и 10 ТЦ. Более удобное отображение рассчитанных величин представлено в таблице 4.5.1.

Таблица 4.5.1 – Основные параметры ВОЛС Москва – Чебоксары

Населенный пункт	Москва	Элект- рогорск	Хряс- тово	Влади- мир	Дмит- риево
№ У.У.	—	1	2	3	
L_{yc} (км)	—	72	99	79	
L (км)	—	72	99	20	59
A (дБ)	—	22,4	29,5	5,3	20,3
$P_{ПР}$ (дБм)	—	-27,4	-27,4	-3,2	-28
$P_{ПЕР}$ (дБм)	-5	2,1	2,1	-7,7	1,6
q (дБ)	—	29,5	29,5	-4,5	29,6

Населенный пункт	Горо- ховец	Н. Нов- город	Бело- зериха	Юнга	Чебок- сары
№ У.У.	4	5	6	7	8
L_{yc} (км)	98	65	105	98	58
L (км)	98	65	105	98	58
A (дБ)	29,2	20,3	32,3	29,2	18,3
$P_{ПР}$ (дБм)	-27,6	-22,9	-26,9	-26,7	15,4
$P_{ПЕР}$ (дБм)	1,9	5,6	2,5	2,7	—
q (дБ)	29,5	28,5	29,4	29,4	—

Схема организации связи и диаграмма уровней ВОЛС Москва – Чебоксары представлена на рис. 4.5.1

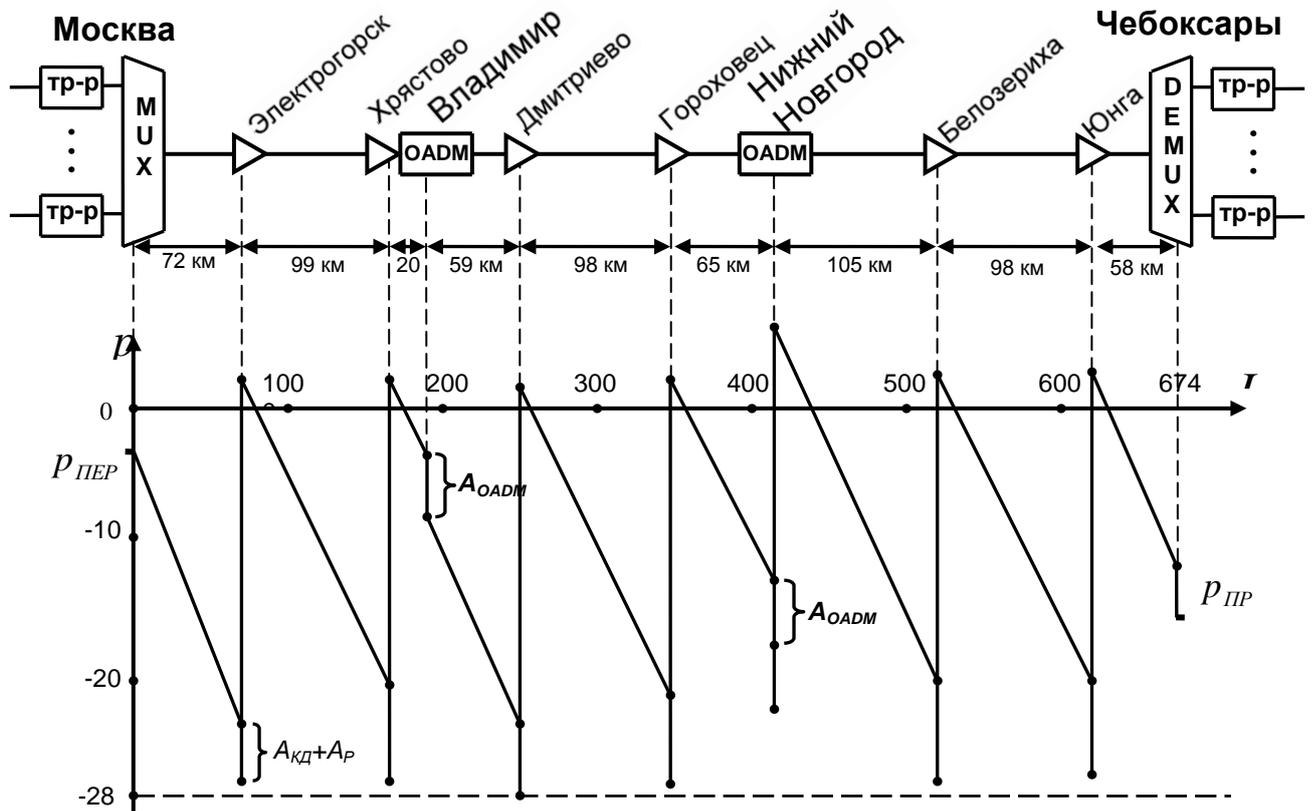


Рисунок 4.5.1 - Схема организации связи и диаграмма уровней ВОЛС
Москва – Чебоксары

4.5.2 Проектирование обратного направления (Чебоксары - Москва)

Проектирование обратного направления производится аналогично прямому.

$$P_{\text{ПЕР}} = -5 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_1 = P_{\text{ПРМИН}} + P_{\text{ПЕР}} - A_{\text{ЗАП}};$$

$$\mathcal{E}_1 = 30 - 5 - 2 = 23 \text{ (дБм)};$$

$$L_{\text{УСМАКС1}} = \frac{\mathcal{E}_1 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{\text{УСМАКС1}} = \frac{23 - 0,5 \cdot 1}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ (км)}.$$

Данное значение энергетического потенциала позволяет разместить первый усилительный пункт в н.п. Юнга

$$L_{\text{VCI}} = 58 \text{ (км)};$$

$$A_1 = L_{\text{VCI}} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{\text{CB}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_1 = 58 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 1 = 18,3 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПР1}} = P_{\text{ПЕР}} - A_1;$$

$$P_{\text{ПР1}} = -5 - 18,3 = -23,3 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{\text{ПР1}} = -23,3$ (дБм);

$$q_1 = 16 + 0,816 \cdot 23,3 - 0,0116 \cdot (-23,3)^2 = 28,6 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПЕР1}} = P_{\text{ПР1}} + q_1;$$

$$P_{\text{ПЕР1}} = -23,3 + 28,6 = 5,3 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_2 = P_{\text{ПРМИН}} + P_{\text{ПЕР1}} - A_{\text{ЗАП}};$$

$$\mathcal{E}_2 = 30 + 5,3 - 2 = 33,3 \text{ (дБм)};$$

$$L_{\text{VCMACK2}} = \frac{\mathcal{E}_2 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{\text{CB}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{\text{VCMACK2}} = \frac{33,3 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 112 \text{ (км)}.$$

Значит, второй усилительный пункт, возможно, разместить в н.п. Белозериха

$$L_{\text{VC2}} = 98 \text{ (км)};$$

$$A_2 = L_{\text{VC2}} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{\text{CB}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_2 = 98 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,2 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПР2}} = P_{\text{ПЕР1}} - A_2;$$

$$P_{\text{ПР2}} = 5,3 - 29,2 = -23,9 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{\text{ПР2}} = -23,9$ (дБм);

$$q_2 = 16 + 0,816 \cdot 23,9 - 0,0116 \cdot (-23,9)^2 = 28,7 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПЕР2}} = P_{\text{ПР2}} + q_2;$$

$$P_{\text{ПЕР}2} = -23,9 + 28,7 = 4,8 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_3 = P_{\text{ПРМИН}} + P_{\text{ПЕР}2} - A_{3\text{АП}};$$

$$\mathcal{E}_3 = 30 + 4,8 - 2 = 32,8 \text{ (дБм)};$$

$$L_{\text{УСМАКС}3} = \frac{\mathcal{E}_3 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{\text{УСМАКС}3} = \frac{32,8 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 106 \text{ (км)}.$$

Данное значение энергетического потенциала позволяет разместить третий усилительный пункт в г. Нижний Новгород.

$$L_{\text{УС}3} = 105 \text{ (км)};$$

$$A_3 = L_{\text{УС}3} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{\text{СВ}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_3 = 105 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 32,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{\text{ПР}3} = P_{\text{ПЕР}2} - A_3;$$

$$P_{\text{ПР}3} = 4,8 - 32,5 = -27,7 \text{ (дБм)}.$$

В данном городе необходимо произвести процедуру ввода вывода двух потоков STM – 16 с помощью оптического мультиплексора ввода вывода (OADM). Динамический диапазон приемного модуля OADM составляет: от -3 дБм до 20 дБм. Таким образом, необходимо установить усилитель EDFA усиливающий сигнал с $q_3 = 16 + 0,816 \cdot 27,7 - 0,0116 \cdot (-27,7)^2 = 29,5 \text{ (дБ)}$, после чего необходимо установить аттенюатор ослабляющий сигнал до $P'_{\text{ПРЕ}3} = -3 \text{ (дБм)}$. С учётом затухания вносимого OADM.

$$P_{\text{ПЕР}3} = P'_{\text{ПРЕ}3} - A_{\text{OADM}};$$

$$P_{\text{ПЕР}3} = -3 - 4,5 = -7,5 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_4 = P_{\text{ПРМИН}} + P_{\text{ПЕР}3} - A_{3\text{АП}};$$

$$\mathcal{E}_4 = 30 - 7,5 - 2 = 20,5 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС4} = \frac{\mathcal{E}_4 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС4} = \frac{20,5 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 65,5 \text{ (км)}.$$

Значит, четвертый усилительный пункт, возможно, разместить в н.п. Гороховец

$$L_{УС4} = 65 \text{ (км)};$$

$$A_4 = L_{УС4} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_4 = 65 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР4} = P_{ПЕР3} - A_4;$$

$$P_{ПР4} = -7,5 - 20,3 = -27,8 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР4} = -27,8$ (дБм);

$$q_1 = 16 + 0,816 \cdot 27,8 - 0,0116 \cdot (-27,8)^2 = 29,6 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР4} = P_{ПР4} + q_4;$$

$$P_{ПЕР4} = -27,8 + 29,6 = 1,8 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_5 = P_{ПРМИН} + P_{ПЕР4} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_5 = 30 + 1,8 - 2 = 29,8 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС5} = \frac{\mathcal{E}_5 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС5} = \frac{29,8 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 100 \text{ (км)}.$$

Данное значение энергетического потенциала позволяет разместить пятый усилительный пункт в н.п. Дмитриево

$$L_{УС5} = 98 \text{ (км)};$$

$$A_5 = L_{УС5} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + 0,5 \cdot 2;$$

$$A_5 = 98 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,2 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР5} = P_{ПЕР4} - A_5;$$

$$P_{ПР5} = 1,8 - 29,2 = -27,4 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР5} = -27,4$ (дБм)

$$q_5 = 16 + 0,816 \cdot 27,4 - 0,0116 \cdot (-27,4)^2 = 29,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР5} = P_{ПР5} + q_5;$$

$$P_{ПЕР5} = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ (дБм)}.$$

В г. Владимир необходимо установить оптический мультиплексор ввода-вывода (OADM).

$$L'_{УС6} = 59 \text{ (км)}.$$

(Величины A'_6 , $L'_{УС6}$ - относятся к участку Дмитриево - Владимир. A''_6 , $L''_{УС6}$ - к участку Владимир - Хрястово. Полная длина усилительного участка составляет $L_{УС6} = L'_{УС6} + L''_{УС6}$)

$$A'_6 = L'_{УС6} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A'_6 = 59 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 0,5 \cdot 2 = 13,7 \text{ (дБ)};$$

$$P'_{ПР6} = P_{ПЕР6} - A'_6;$$

$$P'_{ПР6} = 2,1 - 13,7 = -11,6 \text{ (дБм)}.$$

Полученная величина входного уровня соответствует динамическому диапазону приёмника. Значит, ни каких дополнительных устройств устанавливать не потребуется. С учётом затухания, вносимым OADM, определим $P'_{ПЕР6}$.

$$P'_{ПЕР6} = P'_{ПР6} - A_{OADM};$$

$$P'_{ПЕР6} = -11,6 - 4,5 = -16,1 \text{ (дБ)};$$

$$\mathcal{E}'_6 = P_{ПРМИН} + P'_{ПЕР6} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}'_6 = 30 - 16,1 - 2 = 11,9 \text{ (дБм)};$$

$$L''_{УСМАКС6} = \frac{\mathcal{E}'_6 - A_P \cdot n_P + L'_{УС6} \cdot \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L''_{УСМАКС6} = \frac{11,9 - 0,5 \cdot 2 - 59 \cdot \frac{1,56 \cdot 18}{340}}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 20 \text{ (км)}.$$

Шестой усилительный пункт возможно расположить в н.п. Хрястово расстояние, до которого от г. Владимир

$$L''_{УС6} = 20 \text{ (км)}.$$

Таким образом, общая длина третьего усилительного участка

$$L_{УС6} = L'_{УС6} + L''_{УС6};$$

$$L_{УС6} = 20 + 59 = 79 \text{ (км)};$$

$$A''_6 = L''_{УС6} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} \right) - L'_{УС6} \cdot \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} + A_P \cdot n_P;$$

$$A''_6 = 20 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 79 \cdot \frac{1,56 \cdot 18}{340} + 0,5 \cdot 2 = 11,9 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР6} = P'_{ПЕР6} - A''_6;$$

$$P_{ПР6} = -16,1 - 11,9 = -28 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР6} = -28$ (дБм)

$$q_6 = 16 + 0,816 \cdot 28 - 0,0116 \cdot (-28)^2 = 29,6 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР6} = P_{ПР6} + q_6;$$

$$P_{ПЕР6} = -28 + 29,6 = 1,6 \text{ (дБм)};$$

$$\mathcal{E}_7 = P_{ПРМИН} + P_{ПЕР6} - A_{ЗАП};$$

$$\mathcal{E}_7 = 30 + 1,6 - 2 = 29,6 \text{ (дБм)};$$

$$L_{УСМАКС7} = \frac{\mathcal{E}_7 - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{СВ}}{l_{СТР}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}};$$

$$L_{УСМАКС7} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 99,5 \text{ (км)}.$$

Значит, седьмой усилительный пункт, возможно, разместить в н.п. Электрогорск.

$$L_{yc7} = 99 \text{ (км)};$$

$$A_7 = L_{yc7} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{CTP}} - \frac{\alpha_{KD} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_7 = 99 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,5 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР7} = P_{ПЕР6} - A_7;$$

$$P_{ПР7} = 1,6 - 29,5 = -27,9 \text{ (дБм)}.$$

При $P_{ПР7} = -27,9$ (дБм);

$$q_7 = 16 + 0,816 \cdot 27,9 - 0,0116 \cdot (-27,9)^2 = 29,6 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПЕР7} = P_{ПР7} + q_7;$$

$$P_{ПЕР7} = -27,9 + 29,6 = 1,7 \text{ (дБм)}.$$

Определим уровень сигнала в г. Москва

$$L_{yc8} = 72 \text{ (км)};$$

$$A_8 = L_{yc8} \cdot \left(\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{CTP}} - \frac{\alpha_{KD} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

$$A_8 = 72 \cdot \left(0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,58 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 1 = 22,4 \text{ (дБ)};$$

$$P_{ПР8} = P_{ПЕР7} - A_8;$$

$$P_{ПР8} = 1,7 - 22,4 = -20,7 \text{ (дБм)}.$$

Данный уровень мощности соответствует диапазону приёмного модуля аппаратуры Lambda Driver 1600. Поэтому в г. Чебоксары нет необходимости ставить предусилитель.

Подводя итоги, видим, что для построения обратного направления участка сети, также понадобится 7 усилителей EDFA и 10 ТЦ. Для удобства сведём рассчитанные величины в таблицу 4.5.2.

Таблица 4.5.2 – Основные параметры ВОЛС Чебоксары – Москва

Населенный пункт	Чебоксары	Юнга	Белозериха	Н. Новгород	Гороховец
№ У.У.	—	1	2	3	4
L_{yc} (км)	—	58	98	105	65
L (км)	—	58	98	105	65
A (дБ)	—	18,3	29,5	32,5	20,3
$P_{ПР}$ (дБм)	—	-23,3	-23,9	-27,7	-27,4
$P_{ПЕР}$ (дБм)	-5	5,3	4,8	-7,5	1,8
q (дБ)	—	28,6	28,7	29,5	29,6

Населенный пункт	Дмитриево	Владимир	Хрястово	Электророгск	Москва
№ У.У.	5	6		7	8
L_{yc} (км)	98	79		99	72
L (км)	98	59	20	99	72
A (дБ)	29,2	13,7	11,9	29,5	22,4
$P_{ПР}$ (дБм)	-27,4	-11,6	-28	-27,9	-20,7
$P_{ПЕР}$ (дБм)	2,1	-16,1	1,6	1,7	—
q (дБ)	29,5	-4,5	29,6	29,6	—

Диаграмма уровней ВОЛС Чебоксары – Москва представлена на рис. 4.5.2.

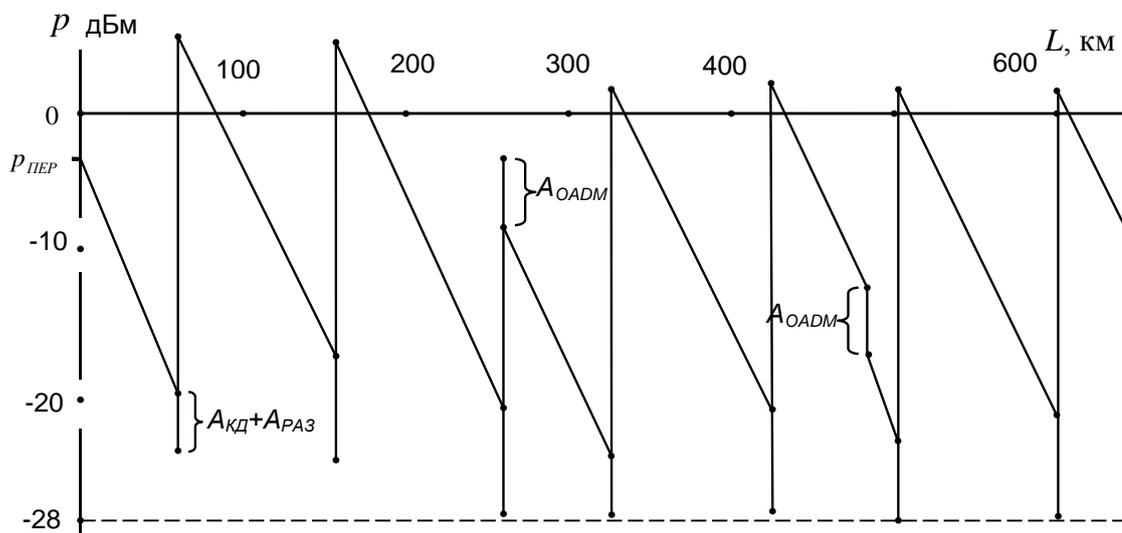


Рисунок 4.5.2 - Диаграмма уровней ВОЛС Чебоксары – Москва

Общее количество используемых компонентов и необходимая инфраструктура для данного варианта ВОЛС:

- количество систем волнового мультиплексирования – 2;
- количество оптических мультиплексоров ввода-вывода – 4;
- количество усилителей EDFA – 14;
- количество территориальных центров – 10.

4.6 Определение помехозащищенности спроектированного участка транспортной сети

Определим помехозащищенность прямого направления.

Согласно формуле (3.13) помехозащищенность i -того участка составляет:

$$A_{з.и} = P_{ПР.и} - P_{Ш.ВХ},$$

где $P_{ПР.и}$ – уровень сигнала на входе i -того усилительного участка;

$P_{Ш.ВХ}$ – уровень шумов приведенный ко входу оптического усилителя.

$$(P_{Ш.ВХ} = -52 \text{ (дБм)}).$$

Определим помехозащищенность каждого участка. Результаты расчетов для направления Москва – Чебоксары и направления Чебоксары – Москва сведены в Таблицу 4.3. и Таблицу 4.4.

Мощность помех от i -го усилительного участка приведенная к точке А (рисунок 3.1.) определяется как:

$$P_{Ш.и} = 10^{0,1 \cdot (P_{ПР} - A_{з.и})} \text{ (мВт)}, \quad (4.7)$$

где $P_{ПР}$ – уровень сигнала в точке А.

По данной формуле определим мощность помех приведенную к точке А каждым участком. Результаты расчетов также сведены в таблице.

Суммарная мощность помех определяется как

$$P_{ш.Σ} = \sum_{i=1}^8 P_{Ш.и}; \quad (4.8)$$

$$P_{ш.Σ} = 10^{-4} + 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-4} + 1,05 \cdot 10^{-4} + 3,55 \cdot 10^{-5} + 8,91 \cdot 10^{-5} + 7,94 \cdot 10^{-5} + 6,3 \cdot 10^{-6};$$

$$P_{ш.Σ} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ (мВт)}.$$

Суммарный уровень помех

$$p_{ш.Σ} = 10 \cdot \lg(6,3 \cdot 10^{-4}) = -32 \text{ (дБм)}.$$

Защищенность сигнала в точке А определяется как

$$A'_3 = p_{\text{ПР}} - p_{\text{ш.}\Sigma}$$

То есть защищенность сигнала для прямого направления участка транспортной сети составляет

$$A'_3 = -15,4 + 32 = 16,6 \quad (\text{дБм}).$$

Определим суммарную мощность помех приведенную к точке А для обратного направления

$$P_{\text{ш.}\Sigma} = 1,15 \cdot 10^{-5} + 1,32 \cdot 10^{-5} + 3,16 \cdot 10^{-5} + 3,24 \cdot 10^{-5} + 2,95 \cdot 10^{-5} + 3,39 \cdot 10^{-5} + 3,31 \cdot 10^{-5} + 6,3 \cdot 10^{-6};$$

$$P_{\text{ш.}\Sigma} = 1,92 \cdot 10^{-5} \quad (\text{мВт}).$$

Суммарный уровень помех

$$p_{\text{ш.}\Sigma} = 10 \cdot \lg(1,92 \cdot 10^{-5}) = -37,2 \quad (\text{дБм}).$$

Защищенность сигнала в точке А составляет

$$A''_3 = -20,7 + 37,2 = 16,5 \quad (\text{дБм}).$$

Таким образом, минимальная помехозащищенность будет не ниже

$$A_{3,\text{СЕТИ}} = 16,5 \quad (\text{дБм}).$$

Данное значение помехозащищенности сигнала соответствует необходимым нормам, определенным в разделе (3.1). Следовательно, на спроектированном участке транспортной сети заданное значение качества передачи будет выполнено.

5 РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ

5.1 Общие положения

Проблема надежности является одной из основных в современной технике, в том числе и технике связи. В современных цифровых сетях ВОЛС по протяженности могут достигать многих тысяч километров. Основной конструктивный элемент ВОЛС – оптический кабель, главным компонентом которого является хрупкое кварцевое оптическое волокно, соизмеримое по диаметру с человеческим волосом. Выход из строя хотя бы одного ОВ в ОК приводит к нарушению передачи многих тысяч каналов связи. Поэтому вопросы надежности ВОЛС необходимо учитывать и тщательно просчитывать на этапах планирования и проектирования.

Надежность ВОЛС – комплексная проблема. Её решение требует применения соответствующих методик оценки, расчета и контроля различных параметров ОК и показателей надежности ВОЛС. Надежность ВОЛС зависит от конструктивно – производственных и эксплуатационных факторов. К конструктивно – производственным относят факторы, связанные с разработкой, проектированием и изготовлением ОК и других вспомогательных изделий и устройств, входящих в состав ВОЛС. К эксплуатационным относят все факторы, влияющие на надежность ОК в процессе его прокладки, монтажа и последующей эксплуатации. Все указанные выше факторы подразделяют на внутренние и внешние. Это деление условно, так как четкой грани между ними провести нельзя. Внутренние факторы зависят от причин, возникающих в процессе изготовления ОВ и ОК, проектирования ВОЛС, монтажа, эксплуатации и старения ОК, внешние практически от них не зависят. Их причинами являются, например, механические, электрические, климатические воздействия, токи КЗ и молний (при наличии металлических элементов в ОК) и т.д.

Рассмотрим подробнее основные понятия и показатели надежности ОК, так и требования к надежности и коэффициенту готовности ВОЛС в целом. Учет требований к ОК по надежности и учет основных факторов, влияющих на надежность ВОЛС, позволяют определять допустимые параметры надежности

составных частей и участков. Такой подход позволяет, но только прогнозировать надежность ВОЛС, но и находить оптимальные решения, обеспечивающие снижение повреждаемости ВОЛС, т.е. повышение надежности и коэффициента готовности ВОЛС и цифровых систем связи в целом является надежностью ОК и ВОЛС.

Понятия надежности регламентированы государственным стандартом ГОСТ 27.002-89 “Надежность в технике. Термины и определения”. Применительно к КЛС основные понятия и показатели надежности можно определить следующим образом.

Отказ кабеля или *ОК* – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния одной, нескольких или всех электрических цепей кабеля, одного или всех ОВ ОК.

Повреждение кабеля – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния кабеля при сохранении работоспособного состояния его электрических цепей или оптических волокон.

Работоспособность кабеля – состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность передавать электрические или оптические сигналы с заданными показателями качества, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Надежность кабеля (КЛС, ВОЛС) – свойство кабеля, и линейных сооружений сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих качество передачи сообщений.

Показатели надежности подразделяют на *расчетные, экспериментальные, эксплуатационные и экстраполированные*. Первые получают расчетным путем на основе теоретических моделей и предпосылок; вторые – в результате целенаправленного эксперимента, третьи – статистической обработкой данных

об отказах и времени восстановления при эксплуатации, четвертые – путем экстраполяции на другую продолжительность и другие условия эксплуатации. Расчетные и экспериментальные показатели более подходят для оценки надежности строительных длин ОК, эксплуатационные и экстраполированные показатели – для определения надежности КЛС и ВОЛС. Аналогично рассмотренному выше можно определить показатели надежности так же и для аппаратной части линий связи и цифровой сети в целом.

5.2 Основные показатели надежности

Комплексным показателем надежности служит коэффициент готовности K_G , характеризующий относительное время нахождения объекта в исправном состоянии

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}, \quad (5.1)$$

где T – среднее время наработки на отказ (между отказами);

T_B – среднее время восстановления, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины и устранение отказа.

Можно оценивать надежность коэффициентом простоя K_P , характеризующим относительное время нахождения объекта в неисправном состоянии

$$K_P = \frac{T_B}{T + T_B} = 1 - K_G. \quad (5.2)$$

Еще одним параметром надежности является интенсивность отказов λ , численно равная среднему количеству отказов в течение одного часа, отнесенному к величине этого временного интервала. Опыт показывает, что в период нормальной эксплуатации (после приработки, но еще до наступления физического износа) интенсивность отказов постоянна. В рассматриваемом случае $T = \frac{1}{\lambda}$, а вероятность того, что объект будет работать безотказно в течение времени t , составляет

$$p(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (5.3)$$

При оценке надежности сложной системы, состоящей из разнотипных элементов и блоков, обычно полагают, что отказы отдельных элементов происходят независимо, а отказ хотя бы одного элемента ведет к отказу системы. В этом случае интенсивность отказов Λ и коэффициент простоя K_{Π} системы можно рассчитать по формулам

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n; \quad (5.4)$$

$$K_{\Pi} = K_{\Pi 1} + K_{\Pi 2} + \dots + K_{\Pi n}, \quad (5.5)$$

где λ_i и $K_{\Pi i}$ - соответственно интенсивность отказов, и коэффициент простоя i -го элемента (блока).

Оценку надежности работы канала производят по следующим показателям: среднему времени между отказами, коэффициенту готовности (простоя). Расчет ведут отдельно по линейно – кабельным сооружениям и аппаратуре.

5.3. Требования к показателям надежности ВОЛС

Требования к показателям надежности следует формировать на основе следующих принципов:

- показатели надежности – долговечность и срок службы – должны быть существенно больше срока окупаемости данной линии передачи;
- на участках линии с различными условиями должны применяться разные марки ОК соответствующих географическим, геологическим и климатическим особенностям трассы, но так, чтобы готовность однородных участков линии длиной 100 км была практически одинакова;
- в исключительных случаях для участков трассы с особо тяжелыми условиями, где обеспечение усредненных показателей готовности требует очень высоких экономических затрат, допускается снижение коэффициента готовности, если оно компенсируется повышенными значениями коэффициента готовности на остальных участках линии;
- гарантированно обеспечить высокие показатели готовности можно взаимным резервированием линий связи;

- показатели надежности и готовности элементов ВОЛС: муфт, оконечных устройств, цистерн, необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП) должны быть не ниже показателей надежности и готовности оптических кабелей;

- показатели готовности линии передачи следует задавать как общие – для канала связи, так и отдельные – для аппаратуры и для ВОЛС;

- в оптических кабелях следует предусматривать резервные оптические волокна;

- при проектировании ВОЛС и разработке мероприятий по повышению их надежности и коэффициента готовности следует учитывать, что снижение плотности отказов увеличивает капитальные затраты, а снижение времени восстановления – эксплуатационные.

На основе статистических данных о повреждаемости подземных ВОЛС и прогнозирования параметров готовности для ВОЛС при оценке надежности на данном участке первичной магистральной сети примем:

- для подземных ОК среднее количество отказов кабеля из – за внешних повреждений на 100 км в год

$$m_{K1} = 0,29;$$

- среднее время наработки на отказ одной строительной длины кабеля

$$T_{K2} = 3225000 \text{ (ч)};$$

- среднее количество отказов одного УП из – за внешних повреждений в год $m_{НУП} = 0,06$;

- коэффициент готовности для магистральной первичной сети с максимальной протяженностью 12500 (км);

$$K_{Г.12500}^{НОРМ} = 0,982.$$

В соответствии с показателями надежности используемого оборудования среднее время между отказами на один комплект составляют:

- модуль демультиплексора

$$T_{DM} = 70000 \text{ (ч)};$$

- модуль мультиплексора

$$T_M = 87600 \text{ (ч)};$$

- модуль мультиплексора ввода-вывода

$$T_{MBB} = 105000 \text{ (ч);}$$

- усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA)

$$T_{OV} = 70000 \text{ (ч);}$$

- источник питания (при условии горячего резерва)

$$T_{ИП} = 78000 \text{ (ч);}$$

- модуль управления

$$T_{МУ} = 61300 \text{ (ч);}$$

- модуль транспондера

$$T_{TP} = 61300 \text{ (ч);}$$

- модуль резервирования 1+1 или сервисный модуль

$$T_{MP} = 61300 \text{ (ч).}$$

5.4 Оценка надежности участка первичной магистральной сети

5.4.1 Оценка надёжности работы линейно-кабельных сооружений

Суммарная интенсивность отказов линейно-кабельных сооружений включает в себя:

- отказы из-за внешних причин (работы сторонних организаций, дефекты строительства, удары молнии, ливни и т. п.), характеризующиеся интенсивностью λ_{K1} , (1/ч·км).

- внутренние отказы кабеля, характеризующиеся средним временем наработки на отказ или интенсивностью отказов одной строительной длины кабеля λ_{K2} , (1/ч).

- отказы УП за счет внешних повреждений, характеризующиеся интенсивностью $\lambda_{УП}$, (1/ч).

$$\Lambda_{\Lambda} = \lambda_{K1} \cdot L_K + \lambda_{K2} \cdot n_{CD} + \lambda_{УП} \cdot n_{УП}, \quad (5.6)$$

где n_{CD} – количество строительных длин кабеля на трассе;

$n_{УП}$ – количество УП ($n_{УП} = 12$).

$$n_{сд} = \frac{L_{к}}{l_{сд}}, \quad (5.7)$$

где $l_{сд}$ – строительная длина кабеля ($l_{сд} = 2$ (км).).

$$n_{сд} = \frac{674}{2} = 337.$$

Среднее количество отказов $\lambda_{к1}$ на один километр за один час определим воспользовавшись значениями представленными в разделе (5.3.)

$$\lambda_{к1} = \frac{0,29}{100 \cdot 8765} = 3,3 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Интенсивность отказов одной строительной длины кабеля:

$$\lambda_{к2} = \frac{1}{3225000} = 3,1 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Аналогично определим среднее количество отказов одного УП в час (из-за внешних повреждений):

$$\lambda_{вп} = \frac{0,06}{8765} = 6,85 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Подставим все найденные значения в формулу (5.6):

$$\Lambda_{\lambda} = 3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 674 + 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot 337 + 6,85 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \approx 4,1 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Среднее время между отказами линейно-кабельных сооружений:

$$T_{\lambda} = \frac{1}{\Lambda_{\lambda}}; \quad (5.8)$$

$$T_{\lambda} = \frac{1}{4,1 \cdot 10^{-4}} = 2439 \text{ (ч)}.$$

Коэффициенты готовности и простоя определим по формулам (5.1) и (5.2). В соответствии с нормами среднее время восстановления кабеля затрачиваемое на обнаружение, поиск причины и устранение отказа

$$T_{вп} = 7,2 \text{ (ч)};$$

$$K_{г\lambda} = \frac{2439}{2439 + 7,2} = 0,99706;$$

$$K_{п\lambda} = 1 - 0,99706 = 0,00294.$$

5.4.2 Оценка надёжности работы аппаратуры

Суммарная интенсивность отказов оборудования двух ОП (оконечных пунктов) включает в себя интенсивности отказов: модуля мультиплексора, модуля демультимплексора, источника питания, модуля управления, модуля транспондера и оптического усилителя.

$$\begin{aligned} \lambda_{ОП} &= 2 \cdot (\lambda_M + \lambda_{DM} + \lambda_{ИП} + \lambda_{МУ} + \lambda_{ТР} + \lambda_{МР} + \lambda_{УС}) = \\ &= 2 \cdot \left(\frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_{DM}} + \frac{1}{T_{ИП}} + \frac{1}{T_{МУ}} + \frac{1}{T_{ТР}} + \frac{1}{T_{МР}} + \frac{1}{T_{УС}} \right). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Подставив в данную формулу показатели надёжности используемой аппаратуры

$$\lambda_{ОП} = 2 \cdot \left(\frac{1}{87600} + \frac{1}{70000} + \frac{1}{78000} + \frac{1}{61300} + \frac{1}{61300} + \frac{1}{61300} + \frac{1}{70000} \right) = 20,34 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Среднее время между отказами для электронного оборудования ОП:

$$T_A^{ОП} = \frac{1}{\lambda_{ОП}}, \quad (5.10)$$

$$T_A^{ОП} = \frac{1}{20,34 \cdot 10^{-5}} = 4916 \text{ (ч)}.$$

Коэффициенты готовности и простоя для ОП:

$$K_G^{ОП} = \frac{T_A^{ОП}}{T_A^{ОП} + T_B^{ОП}}; \quad (5.11)$$

$$K_{П}^{ОП} = \frac{T_B^{ОП}}{T_A^{ОП} + T_B^{ОП}} = 1 - K_G^{ОП}, \quad (5.12)$$

где $T_B^{ОП}$ – время восстановления работоспособности ОРП ($T_B^{ОП} = 0,5$ (ч)).

$$K_G^{ОП} = \frac{4916}{4916 + 0,5} = 0,99999;$$

$$K_{П}^{ОП} = 1 - 0,99999 = 10^{-4}.$$

Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda_{ПВВ}$ оборудования размещенного в ПВВ (пункте ввода-вывода). Суммарная интенсивность отказов оборудования ПВВ включает в себя интенсивности отказов: модуля мультиплексора ввода-вывода и оптического усилителя.

Суммарная интенсивность отказов для двух ПВВ определяется по формуле:

$$\lambda_{ПВВ} = 2 \cdot (2 \cdot \lambda_{МВВ} + 2 \cdot \lambda_{ОУ} + \lambda_{ИП}) = \frac{4}{T_{МВВ}} + \frac{4}{T_{ОУ}} + \frac{2}{T_{ИП}}. \quad (5.13)$$

Подставив в данную формулу показатели надежности используемых компонентов

$$\lambda_{ПВВ} = \frac{4}{105000} + \frac{4}{70000} + \frac{2}{78000} = 12,07 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Среднее время между отказами для оборудования ПВВ:

$$T_A^{ПВВ} = \frac{1}{\lambda_{ПВВ}}; \quad (5.14)$$

$$T_A^{ПВВ} = \frac{1}{12,07 \cdot 10^{-5}} = 8285 \text{ (ч)}.$$

Коэффициенты готовности и простоя для ПВВ:

$$K_{Г}^{ПВВ} = \frac{T_A^{ПВВ}}{T_A^{ПВВ} + T_B^{ПВВ}}; \quad (5.15)$$

$$K_{П}^{ПВВ} = \frac{T_B^{ПВВ}}{T_A^{ПВВ} + T_B^{ПВВ}} = 1 - K_{Г}^{ПВВ} \quad (5.16)$$

где $T_B^{ПВВ}$ – время восстановления работоспособности ПВВ ($T_B^{ПВВ} = 0,5$ (ч)).

$$K_{Г}^{ПВВ} = \frac{8285}{8285 + 0,5} = 0,99994;$$

$$K_{П}^{ПВВ} = 1 - 0,99994 = 6 \cdot 10^{-5}.$$

Интенсивность отказов оборудования УП обусловлена отказами в оптическом усилителе и источнике питания.

$$\lambda_{УП} = 12 \cdot (\lambda_{ОУ} + \lambda_{ИП}) = \frac{12}{T_{ОУ}} + \frac{12}{T_{ИП}}. \quad (5.17)$$

Подставив в данную формулу показатели надежности используемых компонентов

$$\lambda_{УП} = \frac{12}{70000} + \frac{12}{78000} = 3,25 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Среднее время между отказами для оборудования УП:

$$T_A^{УП} = \frac{1}{\lambda_{УП}}; \quad (5.18)$$

$$T_A^{ВП} = \frac{1}{3,25 \cdot 10^{-4}} = 3077 \text{ (ч)}.$$

Коэффициенты готовности и простоя для УП:

$$K_{Г}^{ВП} = \frac{T_A^{ВП}}{T_A^{ВП} + T_B^{ВП}}; \quad (5.19)$$

$$K_{П}^{ВП} = \frac{T_B^{ВП}}{T_A^{ВП} + T_B^{ВП}} = 1 - K_{Г}^{ВП}. \quad (5.20)$$

где $T_B^{ВП}$ – время восстановления работоспособности УП.

В связи с тем, что места расположения УП выбирались только вблизи населённых пунктов, время восстановления работоспособности УП

$$T_B^{ВП} = 1 \text{ (ч)};$$

$$K_{Г}^{ВП} = \frac{3077}{3077 + 1} = 0,99968;$$

$$K_{П}^{ВП} = 1 - 0,99968 = 3,2 \cdot 10^{-4}.$$

Суммарная интенсивность отказов аппаратуры:

$$\Lambda_A = \lambda_{ОП} + \lambda_{ПВВ} + \lambda_{УП}; \quad (5.21)$$

$$\Lambda_A = 20,34 \cdot 10^{-5} + 12,07 \cdot 10^{-5} + 3,25 \cdot 10^{-4} \approx 6,49 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{ч} \right).$$

Коэффициент простоя аппаратуры рассчитаем по формуле (5.5):

$$K_{ПА} = K_{П}^{ОП} + K_{П}^{ПВВ} + K_{П}^{УП}; \quad (5.22)$$

$$K_{ПА} = 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-5} + 3,2 \cdot 10^{-4} = 4,8 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент готовности аппаратуры:

$$K_{ГА} = 1 - K_{ПА}; \quad (5.23)$$

$$K_{ГА} = 1 - 4,8 \cdot 10^{-4} = 0,99952.$$

5.4.3 Оценка работы надёжности участка сети с учётом линейных сооружений и аппаратуры

Коэффициент готовности спроектированного участка транспортной сети:

$$K_{ГС} = 1 - K_{ПЛ} - K_{ПА}; \quad (5.24)$$

$$K_{ГС} = 1 - 0,00294 - 0,00048 = 0,9966.$$

При определении требуемого показателя надежности для участка транспортной сети воспользуемся следующим значением:

$$K_{\Gamma,12500}^{HOPM} = 0,982.$$

Данное значение приведено для магистральной первичной сети с максимальной протяженностью 12500 км. Для приведения данного значения к участку транспортной сети воспользуемся формулой.

$$K_{\Gamma,L}^{HOPM} = (K_{\Gamma,l}^{HOPM})^{L/l}; \quad (5.25)$$

$$K_{\Gamma,l}^{HOPM} = (K_{\Gamma,L}^{HOPM})^{l/L}.$$

Для проектируемого участка сети $l = 674$ (км).

$$K_{\Gamma,l}^{HOPM} = (0,92)^{674/12500};$$

$$K_{\Gamma,l}^{HOPM} = 0,9955.$$

Сопоставив значения показателей надежности для проектируемой сети и требуемыми значениями можно сделать вывод: спроектированный участок сети, по требованиям надежности соответствует нормам.

Для увеличения надёжности транспортной сети, соответствующих требованиям перспективной цифровой сети ($K_{\Gamma,l}^{ПЕРСП} = 0,999$), необходимо создать топологическую структуру, имеющую резервные направления передачи, поскольку отказы в сети, обусловлены главным образом из-за отказов в линейно-кабельных сооружениях, а именно из-за внешних повреждений.

6 ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

6.1 Общие положения

Для создания и ввода в эксплуатацию систем передачи данных, использующих технологию плотного волнового мультиплексирования, необходимо обеспечить разработку и производство целого семейства новых компонентов и подсистем. Как и в любой развивающейся технологии, в технологии DWDM были разработаны новая терминология, технические требования к компонентам и методики измерений. В этой главе описаны основные методы тестирования, применяющиеся для измерения характеристик основных сетевых элементов систем DWDM.

В состав компонентов систем DWDM входят:

- передатчики (включая лазеры и модуляторы);
- приемники (включая фильтры и детекторы);
- приемо-передатчики (ретрансляторы, транспондеры);
- оптические усилители (включая усилители мощности, линейные усилители и предусилители);
- мультиплексоры и демультимплексоры;
- оптические мультиплексоры ввода/вывода;
- маршрутизаторы и устройства оптического кросс-коннекта;
- оптические волокна и кабели;
- компенсаторы дисперсии.

По мере развития технологии DWDM частотные интервалы между каналами уменьшаются, эксплуатационные характеристики и требования к компонентам становятся все выше, а процедуры тестирования сложнее.

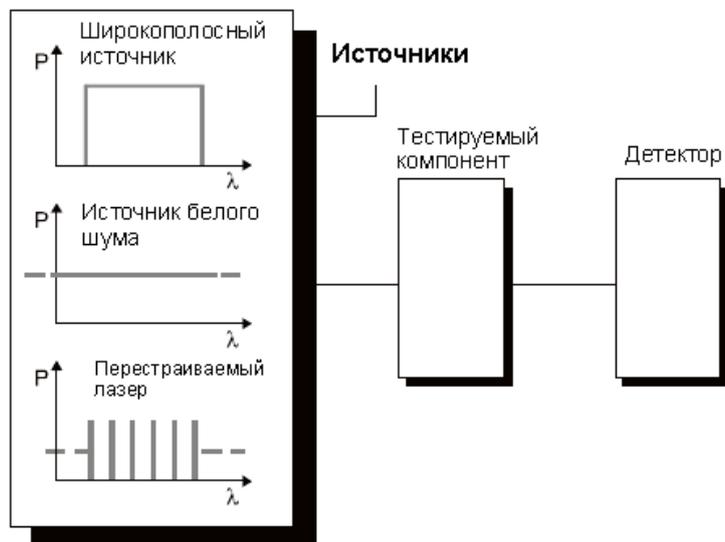


Рисунок 6.1 - Измерительная установка с идеальными источниками излучения.

На тестируемый компонент подают оптический сигнал с известными параметрами, а затем изучают выходной сигнал и определяют, чем он отличается от исходного. Источник излучения и средства анализа выбирают таким образом, чтобы исследовать и анализировать измеряемый параметр тестируемого компонента с минимальным влиянием посторонних воздействий, рисунок 6.1.

На практике не существует идеальных источников с бесконечным диапазоном длин волн, излучение которых спектрально чистое и абсолютно стабильное. Не существует и неограниченно перестраиваемых измерительных инструментов, которые имеют абсолютно стабильную калибровку, высокое разрешение и идеальную точность. Специалист, проводящий тестирование, должен тщательно подбирать оборудование и методику измерений, чтобы обеспечить измерение выбранного параметра с требуемой точностью и не внести нежелательных побочных эффектов.

6.2 Оптические источники для тестирования

Выбирая оптический источник для тестирования пассивных компонентов, следует учесть несколько важных моментов. Чтобы провести надежное измерение компонентов с высокими вносимыми потерями, источник должен быть достаточно мощным. Значительный запас мощности потребуется и при

тестировании на предельно высоких скоростях передачи устройств, обладающих зависимостью параметров от длины волны, так как при этом потребуется сравнивать несколько сигналов, ослабленных по меньшей мере на 40 дБ [7].

Для измерений требуются широкополосные источники с достаточно равно-мерным спектром в рабочем диапазоне, чтобы свести к минимуму коррекцию результатов. Имеющиеся некогерентные широкополосные источники излучения, в том числе с излучением, близким к излучению абсолютно черного тела (лампы накаливания высокой интенсивности, светоизлучающие диоды LED и источники усиленного спонтанного излучения ASE) перекрывают спектральный диапазон, в котором работают компоненты WDM. Так как излучение таких источников не поляризовано или слабо поляризовано, поляризационная зависимость в подобных измерениях мала. Источники излучения ASE дают свет большой интенсивности в широкой области спектра. Они лучше всего подходят для того, чтобы обеспечить равномерное распределение спектральной мощности в заданном диапазоне длин волн.

В качестве узкополосных источников в большинстве случаев успешно используются лазеры с внешним резонатором ECL (External Cavity Laser). Длина волны излучения такого лазера перестраивается механическим способом с высокой точностью (несколько пм) в спектральном диапазоне, превышающем 120 нм. Лазеры ECL имеют высокую степень поляризации излучения и практически монохроматичны, что обычно необходимо при измерении спектральных характеристик.

Спектральные области, в которых используются указанные типы источников излучения, показаны на рисунок 6.2.

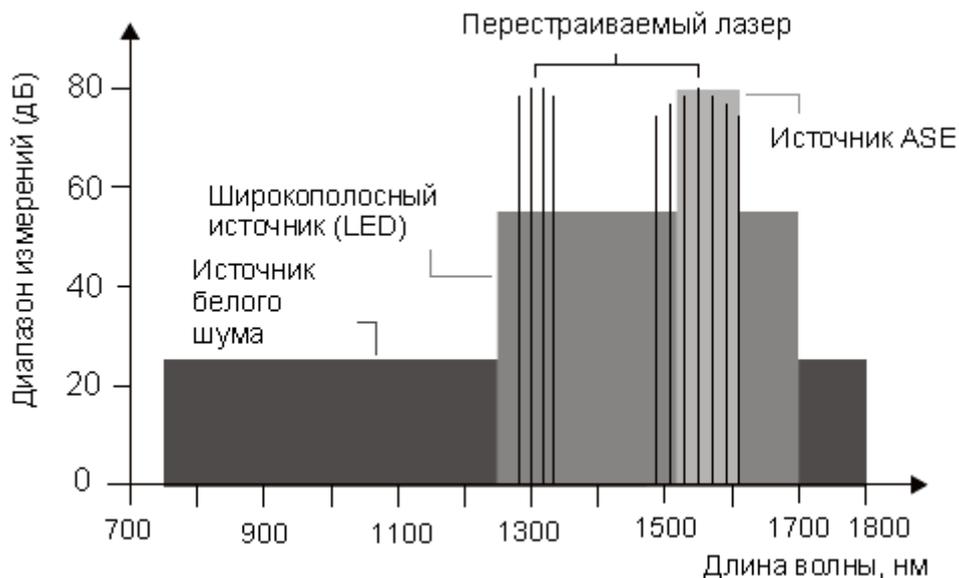


Рисунок 6.2 - Спектральная область излучения и динамический диапазон источников различных типов.

6.3 Приемники для тестирования

Тестирование компонентов систем WDM практически всегда связано с определением длины волны и чувствительности устройства к потерям. Поэтому измерительная установка обычно включает либо систему детектирования заданных длин волн для широкополосного источника, либо широкополосную систему детектирования с перестраиваемым лазерным источником [7].

Требования, предъявляемые к приемникам в задачах тестирования, аналогичны требованиям к источникам. Спектральная характеристика широкополосного приемника излучения должна быть однородной, отклик приемника – линейным в максимально возможном динамическом диапазоне, а вносимый при измерении уровень шумов – минимальным. Желательно также, чтобы поляризационная чувствительность была как можно меньше.

6.3.1 Измерители мощности излучения

В широкополосных оптических измерителях мощности чаще всего используются фотодиоды, имеющие высокую спектральную чувствительность в

стандарт-ном диапазоне длин волн. При этом могут использоваться сменные модули для переключения зон приема. Они имеют гладкую и достаточно равномерную зависимость отклика от длины волны (в особенности фотодетекторы на основе InGaAs). Для обеспечения высокой точности измерений на произвольной длине волны фотодиоды обычно калибруют. Измерители мощности (особенно модели с термоэлектрическими охладителями) имеют высокую стабильность и динамический диапазон, необходимый для большинства случаев измерения потерь, а также малую чувствительность к поляризации.

6.3.2 Анализаторы оптического спектра

На рисунке 6.3 (а, б, в). показаны некоторые способы выделения длин волн, которые используются для анализа оптического спектра.

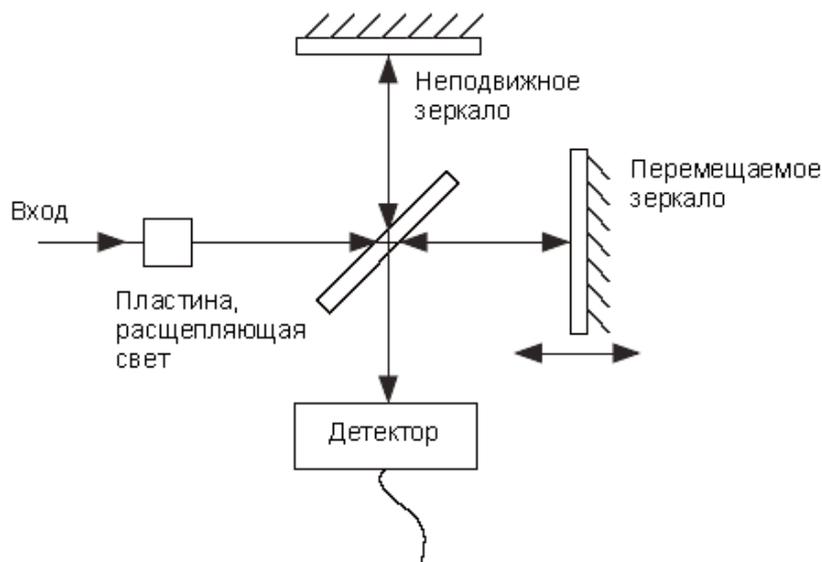


Рисунок 6.3, а - В интерферометрическом методе для интерференции двух пучков света используется перемещаемое зеркало.

В основе первого способа лежит интерференция двух пучков входного излучения. Эти пучки проходят по разным оптическим плечам интерферометра Майкельсона (фиксированной и переменной длины), и интенсивность света на выходе интерферометра меняется из-за перемещения зеркала. Попадая далее на фотодетектор, свет преобразуется в электрический сигнал, анализ которого с

помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяет получить спектр исходного сигнала.

В другом подходе (рисунок 6.3, б) используется дисперсионная решетка, отражающая лучи под разными углами в зависимости от длины волны. При повороте решетки происходит сканирование всех длин волн, присутствующих в спектре входного сигнала, через выходную щель прибора. Для увеличения разрешения используется двойной проход оптического пучка через систему.

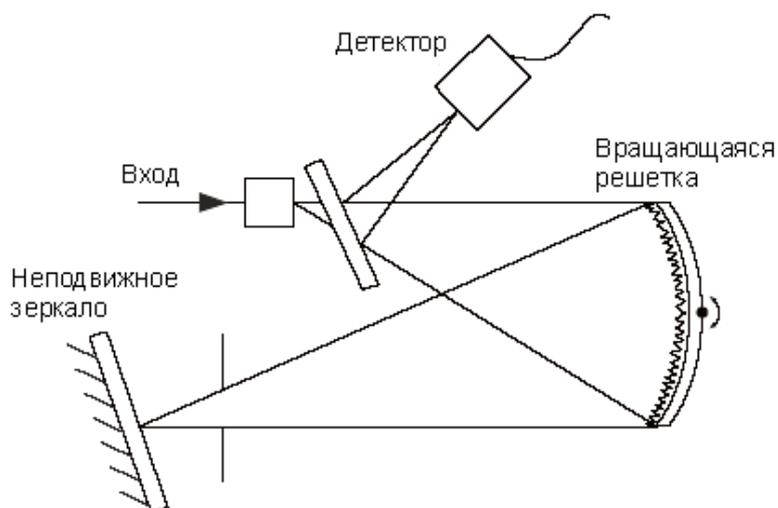


Рисунок 6.3, б. Вращающаяся дисперсионная решетка отражает на зеркало излучение с разными длинами волны в зависимости от угла поворота.

Третий способ (рисунок 6.3, в) аналогичен только что рассмотренному, но в данной конструкции решетка закреплена. Отраженные решеткой спектральные составляющие входного пучка распределяются по линейке отдельных фотодетекторов (или попадают на одиночный перемещаемый фотодетектор).

Перечислим важнейшие характеристики анализатора оптического спектра:

- динамический диапазон – определяет возможность измерения амплитуд сигналов в широком диапазоне. Большой динамический диапазон может потребоваться, например, при исследовании полосы пропускания оптического канала, когда могут быть важны аномальные характеристики боковой полосы, уровень мощности которой ниже уровня основного сигнала более чем на 50 дБ.

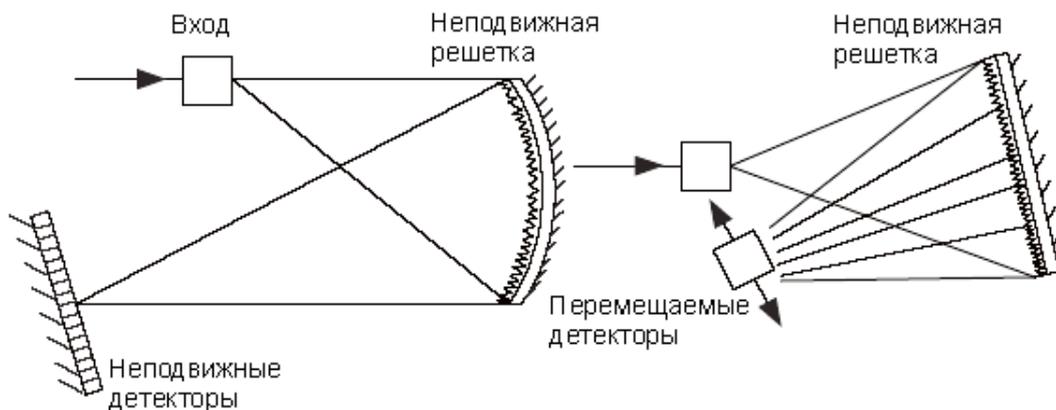


Рисунок 6.3, в - Фиксированная решетка разделяет входной пучок на спектральные составляющие, которые затем попадают на детекторы.

- Чувствительность – способность измерять оптические сигналы маленькой интенсивности.

- Разрешение по полосе пропускания RBW (Resolution Bandwidth) – возможность различения близко расположенных длин волн, которая необходима для исследования спектральной структуры каналов систем DWDM. RBW приобретает все большее значение с увеличением числа используемых каналов в прежнем волновом диапазоне.

- Точность – возможность точно и правильно измерять длины волн и мощность.

Первые две характеристики зависят в основном от используемого детектора, следовательно, выбирая детектор, можно частично удовлетворить требованиям конкретного измерения.

6.3.3 Измерители длины волны

Измеритель длины волны представляет второй тип приемника с избирательностью по длинам волн. По сути, он является интерферометром Майкельсона, рис. 6.3, а. Перемещение зеркала в опорном плече интерферометра приводит к изменению картины интерференции двух пучков света. При этом результирующий сигнал на фотодетекторе изменяется синусоидально для входного монохроматического светового пучка, а для пучка с

несколькими длинами волн - по более сложному закону. Чтобы получить спектр входного оптического сигнала, электрический сигнал на выходе фотодетектора обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье.

Измеритель длины волны по характеристикам сопоставим с анализатором OSA, однако их сильные и слабые стороны полностью различаются. Во-первых, измеритель длины волны полностью использует всю энергию источника, а потому измерения в спектральном диапазоне (или на нескольких разных длинах волн) с помощью измерителя длин волн выполняются одновременно, в отличие от OSA (детектор OSA в каждый момент времени наблюдает лишь за небольшой спектральной зоной). Измеритель длины волны удобен для масштабного, быстрого тестирования каналов. Точная информация об относительной длине волны извлекается из сигнала методами БПФ, а привязка к абсолютной длине волны производится по встроенному в прибор гелий-неоновому (He-Ne) лазеру. Таким образом, в итоге абсолютная точность измерений довольно высока (лучше, чем 0,005 нм), чего вполне достаточно для исследования спектрального распределения каналов, например, в 80-канальных системах WDM.

Измеритель длин волн имеет ограниченный динамический диапазон измерений (чуть больше 30 дБ), чего недостаточно для полного описания характеристик каналов системы DWDM, а также низкую чувствительность к слабым сигналам. Тем не менее, высокая точность измерения длин волн и возможность одновременной регистрации всех длин волн полосы пропускания делают его весьма полезным дополнением к анализатору спектра OSA. Измерители длин волн со встроенным эталоном абсолютной длины волны предназначены для измерений, требующих частой калибровки.

6.4 Типовые конфигурации тестирования компонентов

Существует много способов объединения широкополосных и перестраиваемых источников и приемников для измерения зависимости параметров компонентов систем WDM от длины волны. Ниже на примере

многосторонней задачи тестирования мультиплексора (демультиплексора) рассмотрены наиболее распространенные конфигурации.

6.4.1 Тестирование мультиплексоров и демультиплексоров

Вносимые потери

На рис. 6.4. изображена типовая установка для определения вносимых потерь мультиплексора/демультиплексора. На вход мультиплексора/демультиплексора подают сигнал широкополосного источника ASE, спектр которого равномерен и покрывает рабочую полосу устройства. Выходной сигнал, поступающий в анализатор OSA, непосредственно отображает форму кривой вносимых потерь. Относительные значения потерь можно привести к абсолютным, выполнив не-обходимые опорные измерения – для этого источник подключают напрямую к OSA. Спектральное разрешение измерения в этом случае ограничено разрешением анализатора (OSA RBW) и формой его полосы пропускания. Чтобы облегчить или автоматизировать тестирование многоканальных устройств, используется оптический переключатель 1xN. Все компоненты измерительной системы должны обладать низкой чувствительностью к состоянию поляризации светового сигнала.

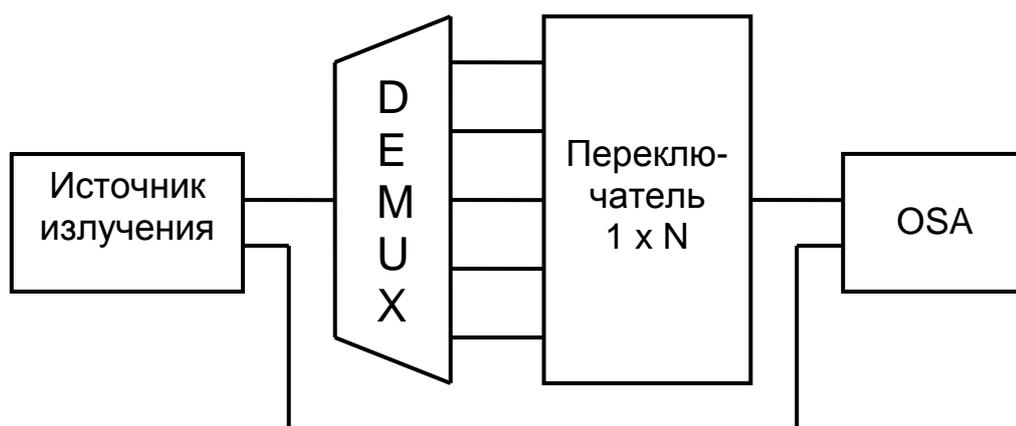


Рисунок 6.4 - Установка для определения вносимых потерь мультиплексора/демультиплексора.

Перекрестные помехи

Чтобы измерять перекрестные помехи между каналами DWDM, источник

ASE, использовавшийся в предыдущих схемах измерений, заменяют на узкополосный перестраиваемый лазерный источник. Далее пошагово изменяют длину волны излучения перестраиваемого источника (на величину волнового разрешения) и на каждом шаге сканируют анализатором OSA все каналы мультиплексора/демультиплексора. Измерения повторяются до тех пор, пока не будет исследован весь заданный диапазон длин волн. Разрешение измерения определяется шагом перестройки лазера, а не спектральным разрешением анализатора, и кривая потерь может быть определена с разрешением лучше 0,001 нм в большом динамическом диапазоне, рисунке 6.5, а.

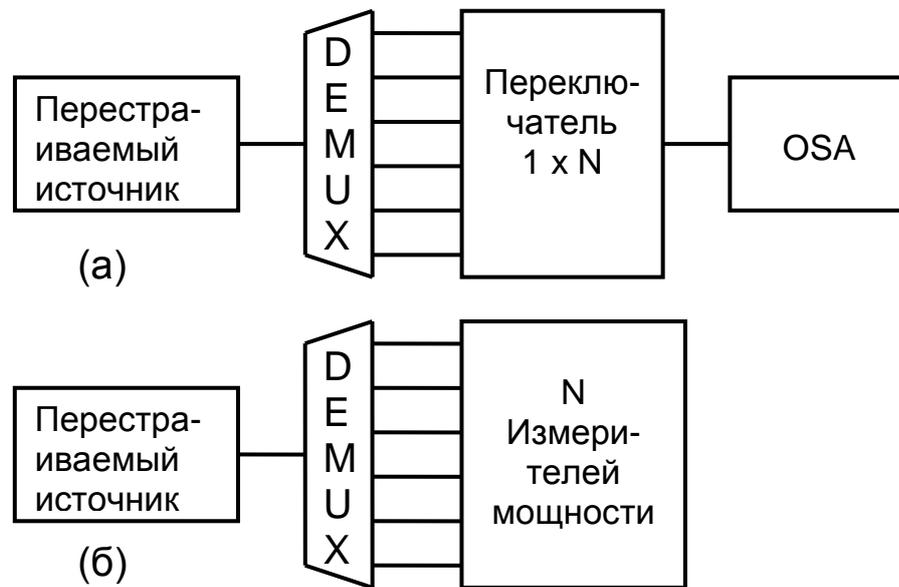


Рисунок 6.5 - Измерение перекрестных помех с помощью:

- а) перестраиваемого лазера с анализатором OSA или б) с измерителями мощности.

Потери на отражение

Оптические потери на отражение ORL (Optical Return Loss) измеряются с помощью источника излучения, разветвителя и фотодетектора, часто называемого измерителем обратного отражения OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometer). На этапе калибровки вместо тестируемого компонента подключают компонент с известным коэффициентом отражения; после чего в измерительную схему вводят сам тестируемый компонент. К измеренной детектором отраженной мощности применяют поправочный коэффициент, найденный на этапе калибровки, и получают значение ORL. Такая схема

измерения с мощным, некогерентным оптическим источником и чувствительной системой детектирования высокого разрешения позволяет обнаружить ORL на уровне -70 дБ и ниже [5].

ORL могут зависеть от длины волны. Чтобы определить эту зависимость, в рассмотренной измерительной конфигурации используют мощный, перестраиваемый лазер с умеренной степенью когерентности либо широкополосный источник (лазер ASE); при этом анализатор OSA используют в качестве детектора, рисунок 6.6. Однако из-за ограниченного динамического диапазона OSA трудно проследить волновую зависимость ORL при уровне ниже -40 дБ.

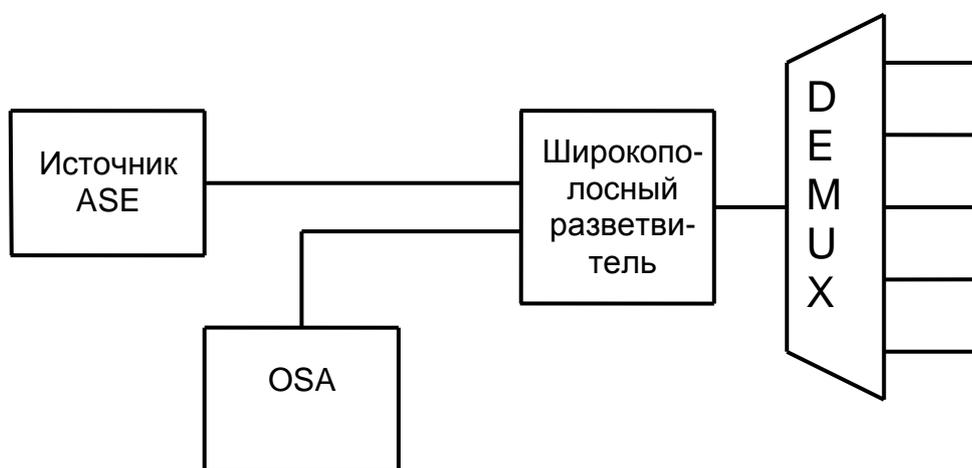


Рисунок 6.6 - Измерение зависимости ORL от длины волны.

Измерение полосы пропускания

Для измерения оптической полосы пропускания используется процедура, аналогичная процедуре измерения вносимых потерь. От спектральной характеристики самой измерительной системы можно избавиться при помощи опорного измерения. На рис. 6.7. показана типовая измерительная установка.

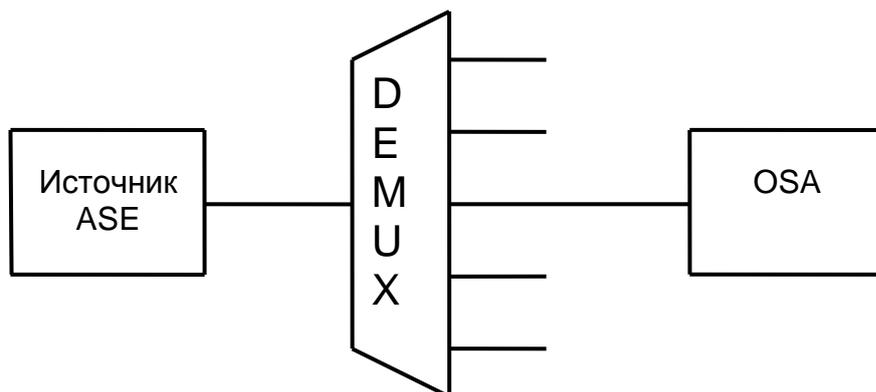


Рисунок 6.7 - С помощью простой схемы измерений, использующей источник ASE и анализатор OSA, определяют характеристики полосы пропускания.

6.4.2 Тестирование оптических источников

Центральная длина волны и мощность излучения на выходе лазерных диодов являются важными параметрами систем WDM, поэтому производителям необходимы автоматические (или, по крайней мере, полуавтоматические) методы измерения этих параметров. Для этого используются волновые измерители и высокоскоростные измерители мощности излучения с большой скоростью выборки и соответствующие оптические переключатели.

На рисунке 6.8. приведена конфигурация измерительной системы для быстрого сканирования зависимости выходной мощности от входного тока лазера сразу для четырех устройств при помощи четырехканального измерителя мощности. Повторное измерение длины волны при одном или нескольких заданных уровнях мощности можно обеспечить с помощью оптического переключателя 1×4 .

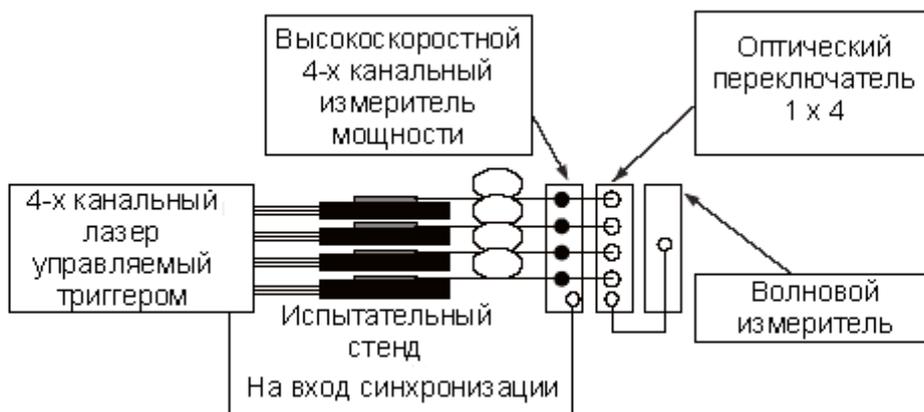


Рисунок 6.8 - Измерение характеристик лазерного источника.

Последовательность измерений:

1. Управляющий триггер сигнализирует о начале нарастания тока, подаваемого на все лазеры, срабатывая чуть ниже ожидаемого порога генерации лазера.

2. Этот же триггер задает начало измерения мощности входных каналов. Если скорость нарастания управляющего тока постоянна, то выходную мощность в любой момент времени можно точно сопоставить с линейно меняющимся входным током на протяжении всего цикла сканирования. Используя быстродействующие измерители мощности, можно снимать несколько тысяч показаний в секунду, что обеспечивает достаточное разрешение в пороговой области, несмотря на малое время измерений.

3. После определения зависимости выходной мощности излучения от тока (кривая L-I) устройство, управляющее током лазера, задает уровень тока для каждого канала немного выше порога генерации (рабочий уровень мощности). После этого можно точно измерить длину волны при помощи волнового измерителя.

6.4.3 Тестирование оптических приемников

Полупроводниковые фотодетекторы входят в режим насыщения с увеличением входной мощности, поэтому необходимо тестировать их линейность. Смещение p-i-n перехода улучшает линейность приемника, но

увеличивает шум темнового тока, что ограничивает измерение слабых сигналов. Различные меры, предпринимаемые для увеличения динамического диапазона (предусилители с высоким входным сопротивлением, автоматические цепи управления усилением или автоматический выбор постоянных шагов усиления), увеличивают нелинейности, особенно для сигналов малой мощности или в схемах усиления с дискретным шагом.

На рисунке 6.9. показана типовая конфигурация для измерения нелинейностей методом суперпозиции. Эту схему можно легко автоматизировать.

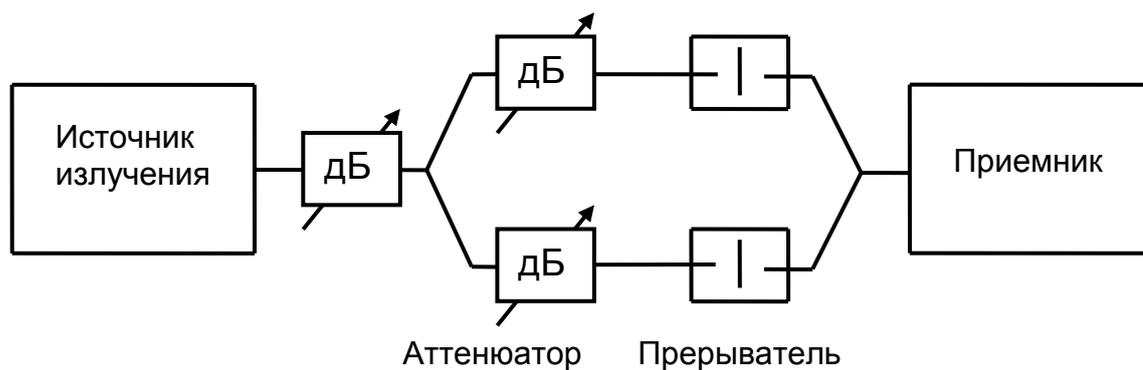


Рисунок 6.9 - Автоматизированная схема определения временных характеристик и чувствительности приемника.

Список литературы

1. Оптические телекоммуникационные системы: учебник для вузов / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов. Под ред. В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком. – 2017. – 368 с.
2. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс]: учебное пособие / О.К. Скляр. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 268 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959> (дата обращения 20.06.2018)
3. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов / Э.Л. Портнов – М.: Горячая линия - Телеком, 2013. – 544 с.
4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов, В.И. Иванов, В.А. Бурдин, А.В. Крыжановский, Л.А. Марыкова. – М.: Горячая линия - Телеком, 2016. – 424 с.
5. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Фокин. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 440 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75523> (дата обращения 20.06.2018)
6. Листвин В.Н. DWDM-системы / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Техносфера, 2017. – 352 с.
7. Гордиенко В.Н. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, М.С. Тверецкий. – М: Горячая линия, 2015. – 396 с.
8. РД 45.195-2001 Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно.
9. РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.

10. Рекомендация МСЭ-Т М.2101 Нормы на качественные характеристики трактов и секций мультиплексирования СЦИ при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации.
11. Рекомендация МСЭ-Т G.828 Нормы на параметры ошибок международных трактов СЦИ постоянной скорости.
12. Рекомендация МСЭ-Т G.829 Параметры ошибок мультиплексных и регенерационных секций СЦИ.
13. Рекомендация МСЭ-Т G.957 (06/99) Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии.
14. Рекомендация МСЭ-Т G.691 (10/2000) Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии с оптическими усилителями.
15. Рекомендация МСЭ-Т G.692 (10/1998) Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями.

Список основных сокращений и обозначений

ОЦТС - оптические цифровые телекоммуникационные системы

ЦСП - цифровая система передачи

СЦИ - синхронная цифровая иерархия

ВОСП - цифровая волоконно-оптическая система передачи

ЦВОСП - волоконно-оптическая система передачи

А-ВОСП - аналоговая волоконно-оптическая система передачи

ОВ – оптическое волокно

МИ - модуляция интенсивности

АИМ - амплитудно-импульсная модуляция

ИКМ - импульсно-кодовая модуляция

ФНЧ - фильтр нижних частот

РЛ - линейный регенератор

ВОУ - волоконно-оптический усилитель

ПОМ - передающий оптический модуль

ПРОМ - приемный оптический модуль

ФПУ – фотоприемное устройство

RIN - относительная интенсивность шума

DSF - оптическое волокно со смещенной дисперсией

NDSF – оптическое волокно с несмещенной дисперсией

NZ-DSF – оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией

Приложение А

Пример технического задания на курсовое проектирование

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

"УТВЕРЖДАЮ"

Зав. кафедрой СВЧ и КР

_____ С.Н. Шарангович

« ____ » _____ 201__ г.

ЗАДАНИЕ № ____

на курсовой проект по дисциплине

Оптические цифровые телекоммуникационные системы

студенту РТФ гр. 154 Иванову Ивану Ивановичу

Тема проекта: Проектирование оптической системы связи на основе СЦИ Томск-Москва

1. Срок сдачи работы: «__» _____ 201__ г.

2. Цель проекта: проектирование и расчет оптической цифровой системы передачи.

3. Исходные данные для проектирования:

3.1. Конечные административные пункты ВОСП: _____

3.2. Число цифровых каналов связи: _____

3.3. Коэффициент битовых ошибок – не более 10^{-12} .

4. Вопросы, подлежащие разработке:

4.1. Схема организации связи

4.1.1. Составление схемы организации связи

4.1.2. Определение оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендаций МСЭ-Т

4.1.3. Выбор аппаратуры и типа ОК ВОСП

4.1.4. Выбор передающего и приёмного модулей, оптического усилителя, компенсатора дисперсии

4.2. Расчет длины регенерационного и усилительного участков

4.2.1. Определение необходимого качества передачи системы связи

4.2.2. Определение максимальной длины усилительного участка

4.2.3. Определение максимальной длины регенерационного участка

- 4.2.4. Проектирование прямого направления
- 4.2.5. Проектирование обратного направления
- 4.2.6. Определение помехозащищенности спроектированного участка сети

5. Содержание пояснительной записки:

Пояснительная записка оформляется строго по ОС ТУСУР 01-2013.

- 5.1. Титульный лист
- 5.2. Реферат
- 5.3. Лист задания с подписью преподавателя
- 5.4. Содержание
- 5.5. Введение (с указанием цели и задач проекта)
- 5.6. Основная часть (с выводами по каждому разделу)
- 5.7. Заключение (с указанием полученных результатов и их сопоставлением с требованиями технического задания)
- 5.8. Список использованной литературы
- 5.9. Приложения

6. Графический материал:

- 6.1. Схема организации связи
- 6.2. Диаграмма уровней сигналов

7. Рекомендуемая литература:

- 7.1. Перин А. С. Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем: Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» [Электронный ресурс] / А. С. Перин, С. Н. Шарангович. – Томск: ТУСУР, 2018. – 110 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7989>
- 7.2. Оптические телекоммуникационные системы: учебник для вузов / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарифутдинов. Под ред. В. Н. Гордиенко. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2017. – 368 с.
- 7.3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления – М.: ТУСУР, 2013. – 53 с.

Дата выдачи задания: «__»_____ 201_ г.

Руководитель проекта:

доцент каф. СВЧ и КР, к.т.н. _____ / Перин А.С. /

Задание принял к исполнению:

студент гр. _____ / _____ /

Учебное издание

А.С. Перин, С.Н. Шарангович

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию
для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи»

Формат --.

Усл. печ. л. --. Тираж -- . Заказ -- .

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.