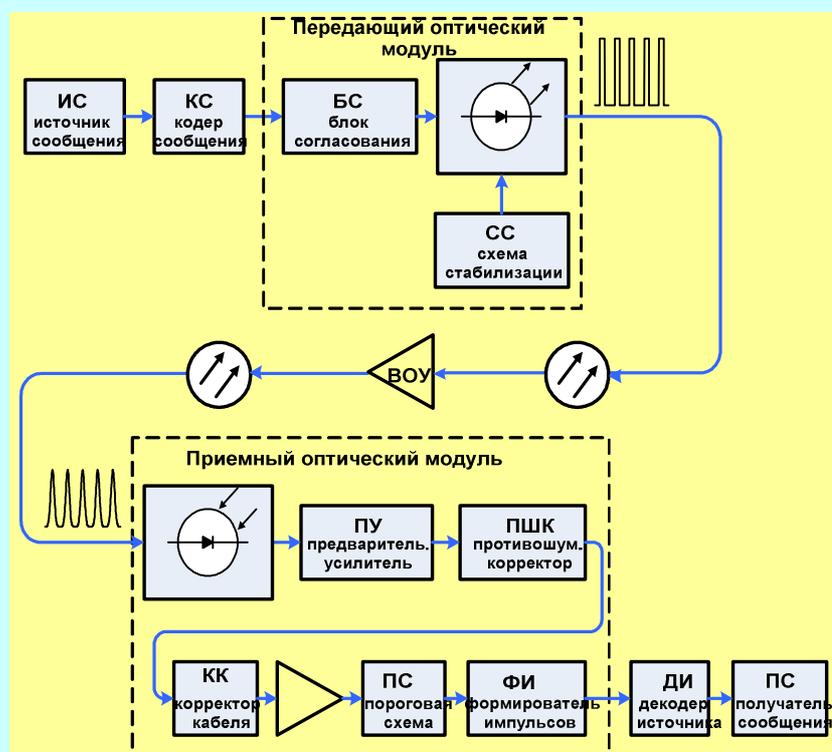


А.П. Коханенко, С.Н. Шарангович

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию



Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники**

**А.П. Коханенко, С.Н. Шарангович**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию  
по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» для  
студентов специальности 210401 – Физика и техника оптической связи

**Томск 2012**

Рекомендовано к изданию кафедрой СВЧиКР Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УДК 537.8(075.8) + 621.371(075.8)

Рецензент

**Шандаров В.М.** , д-р физ.-мат. наук, проф. каф. СВЧиКР ТУСУРа

**Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем:** учебно-методическое пособие по курсовому проектированию// Коханенко А.П., Шارانгович С.Н. / Под ред. С.Н. Шаранговича – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2012. -120 с.

В учебно-методическом пособии приведены основные теоретические материалы по проектированию цифровых волоконно-оптических систем передачи. 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, вопросы экологии, безопасности и технико-экономическое обоснование проектируемой ВОСП. 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 по специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки «Телекоммуникации», а также может быть полезным при дипломном проектировании.

© Коханенко А.П., Шарангович С.Н., 2012  
© Томский гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2012.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	6
<b>1 Общие принципы построения современных оптических сетей связи</b> .....	7
<b>2 Оптические компоненты современных оптических сетей связи</b> ...	12
2.1 Требование к компонентам оптических систем .....	12
2.2 Мультиплексоры и демупльтиплексоры.....	13
2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов.....	16
2.4 Оптические усилители.....	17
2.5 Передатчики.....	26
2.6 Фотоприемники.....	28
2.7 Оптическое волокно.....	29
<b>3 Расчет длины регенерационного и усилительных участков</b> .....	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
<b>4 Схема организации связи</b> .....	40
4.1 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети... ..	40
4.2 Построение ВОЛС .....	44
4.2.1 Проектирование прямого направления ВОЛС.....	44
4.2.2 Проектирование обратного направления ВОЛС .....	53
4.3. Определение помехозащищенности участка транспортной  сети .....	61
<b>5 Расчёт показателей надёжности</b> .....	62
5.1 Общие положения.....	62
5.2 Основные показатели надежности.....	64
5.3 Требования к показателям надежности ВОЛС.....	66
5.4 Оценка надежности участка первичной магистральной сети.....	68
5.4.1 Оценка надёжности работы линейно-кабельных сооружений.....	68
5.4.2 Оценка надёжности работы аппаратуры.....	69
5.4.3 Оценка работы надёжности участка сети с учётом линейных сооружений и аппаратуры.....	72
<b>6 Тестирование компонентов и оценка характеристик</b> .....	73
6.1 Общие положения.....	73
6.2 Оптические источники для тестирования.....	75

6.3 Приемники для тестирования.....	76
6.3.1 Измерители мощности излучения.....	77
6.3.2 Анализаторы оптического спектра.....	77
6.3.3 Измерители длины волны.....	79
6.4 Типовые конфигурации тестирования компонентов.....	80
6.4.1 Тестирование мультиплексоров и демультимплексоров.....	81
6.4.2 Тестирование оптических источников.....	84
6.4.3 Тестирование оптических приемников.....	85
<b>7 Техническое описание используемой аппаратуры и оптических кабелей.....</b>	<b>86</b>
7.1 Система волнового мультиплексирования Lambda Driver 1600.....	86
7.2 Терминальный мультиплексор SDH компании «Lucent Technologies» .....	90
7.3 Оптический усилитель на волокне, легированном эрбием .....	91
7.4 Одномодовый оптический кабель компании «Москабель-Фуджикура».....	93
7.5 Волокно для компенсации дисперсии компании «Москабель-Фуджикура».....	94
<b>8 Разработка вопросов по экологии и безопасности жизнедеятельности при работе в ЛАЦ.....</b>	<b>94</b>
8.1 Техника безопасности при наладке и монтаже оборудования.....	94
8.2 Роль освещения в создании здоровых условий труда.....	97
8.3 Виды и системы освещения.....	98
8.4 Расчет освещенности ЛАЦ.....	100
<b>9 Технико - экономическое обоснование проекта.....</b>	<b>105</b>
9.1 Расчёт капитальных затрат на создание участка транспортной сети с использованием аппаратуры WDM.....	105
9.2 Расчет эксплуатационных расходов.....	109
9.3 Расчёт годового экономического эффекта.....	114
<b>Список литературы.....</b>	<b>116</b>
<b>Список основных сокращений и обозначений.....</b>	<b>117</b>
<b>Приложение Техническое задание на курсовое проектирование</b>	<b>118</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» изучается студентами специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки «Телекоммуникации» в 7,8,9 семестрах и относится к блоку специальных дисциплин. 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). Во втором 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. В седьмом, восьмом и девятом разделах приведены описание используемой в ОЦТС аппаратуры, рассмотрены вопросы экологии и БЖД, дано технико-экономическое обоснование проектируемой ОЦТС.

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..

# **.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 ММФ 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.

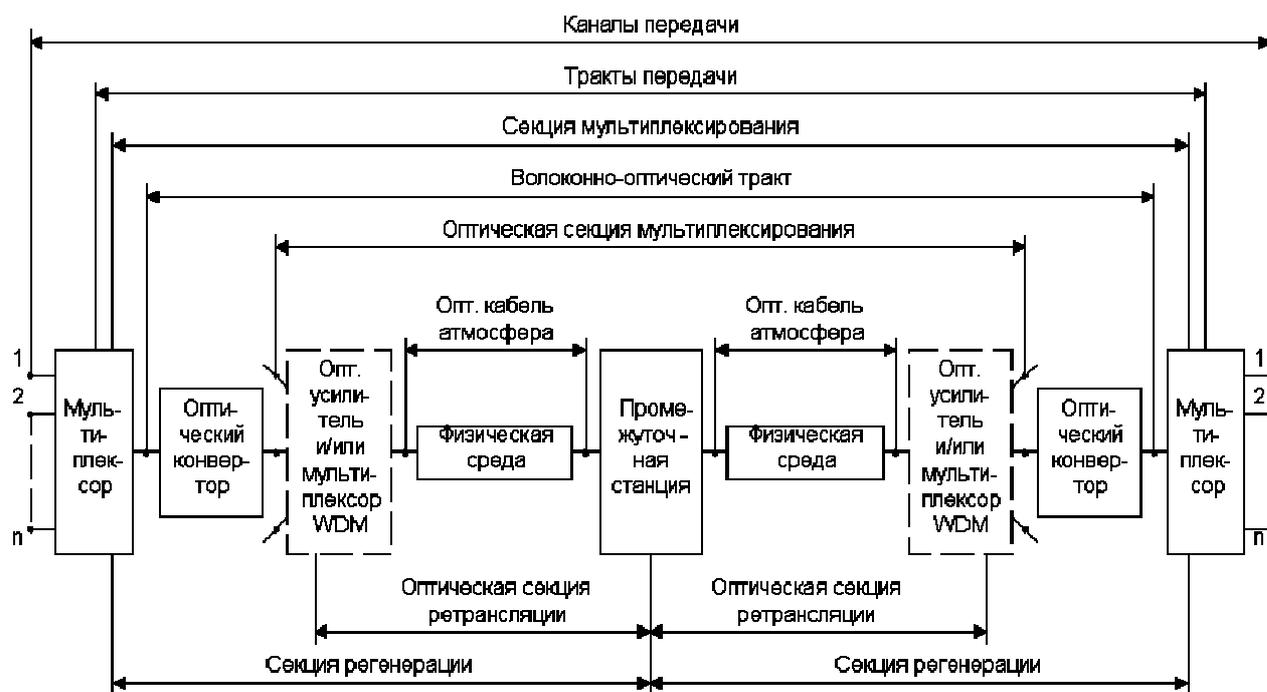


Рисунок 1.1 - Обобщенная схема оптической системы передач.

Минимальные 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  $\geq 200$  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  $\leq 50$  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, демультимплексоров, 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, демультимплексорах, 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).

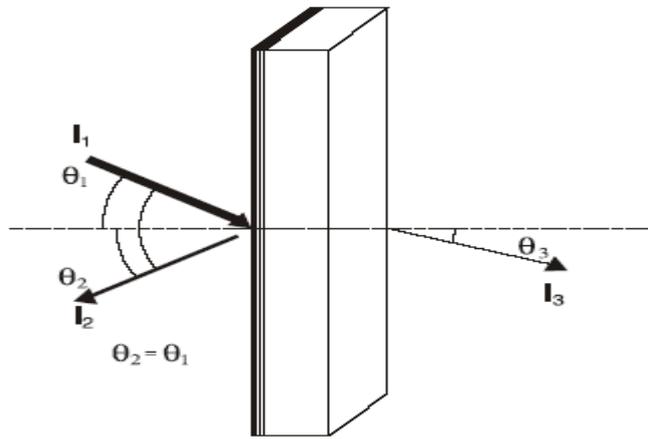


Рисунок 2.1 - Тонкопленочный фильтр.  $\lambda_1$  – падающая волна,  $\lambda_2$  – отраженная,  $\lambda_3$  – прошедшая.

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.

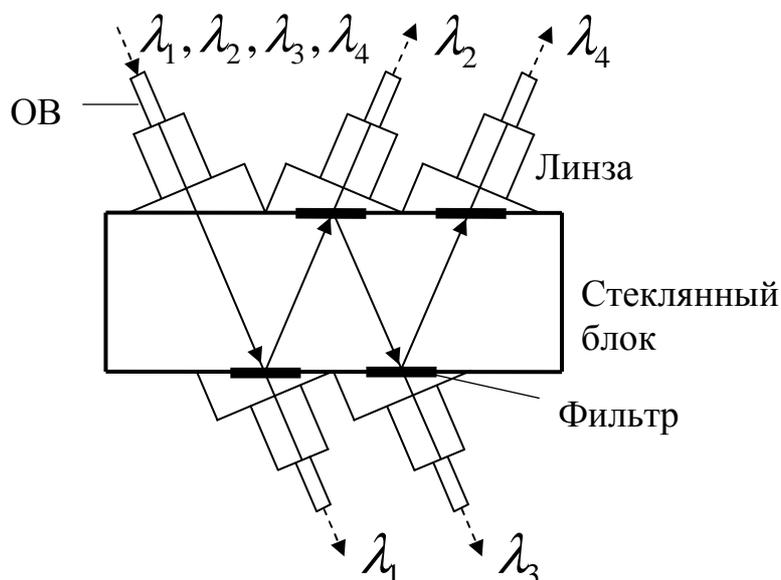


Рисунок 2.2 - Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала.

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].

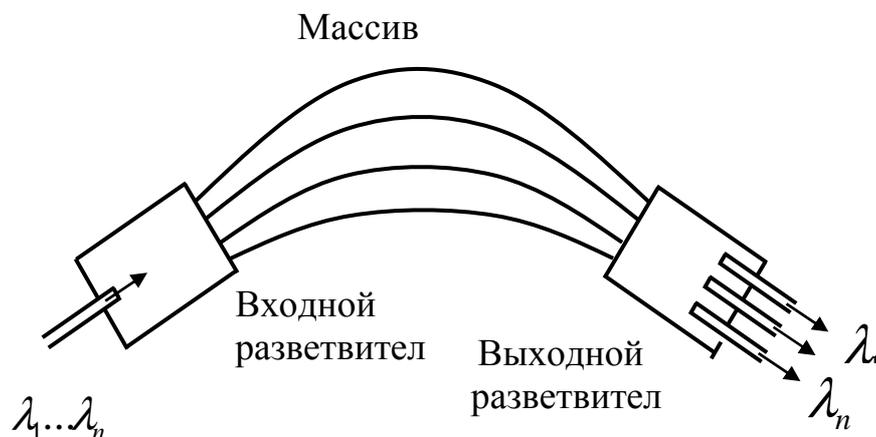


Рисунок 2.3 - Решетка на основе массива волноводов AWG – принцип работы.

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/вы-вода каналов OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), которые выполняют эту операцию, не преобразуя сигналы всех каналов в электрическую форму и затем обратно (рисунок 2.4).

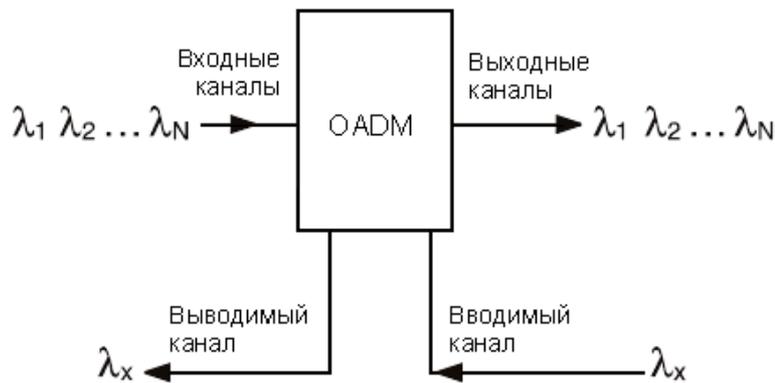


Рисунок 2.4 - Мультиплексор ввода/вывода каналов.

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.

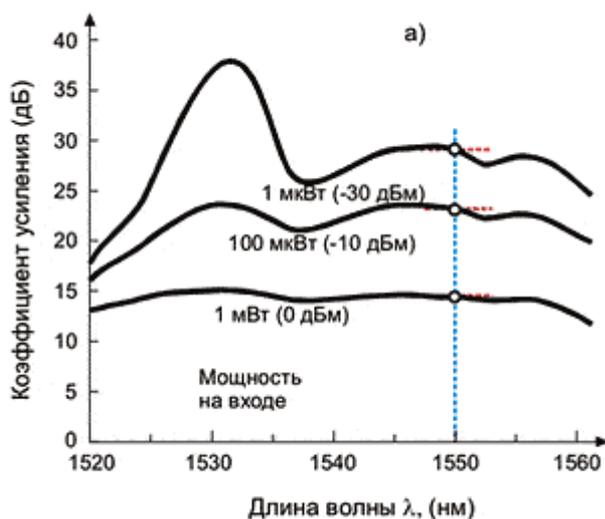


Рисунок 2.5 а - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности.

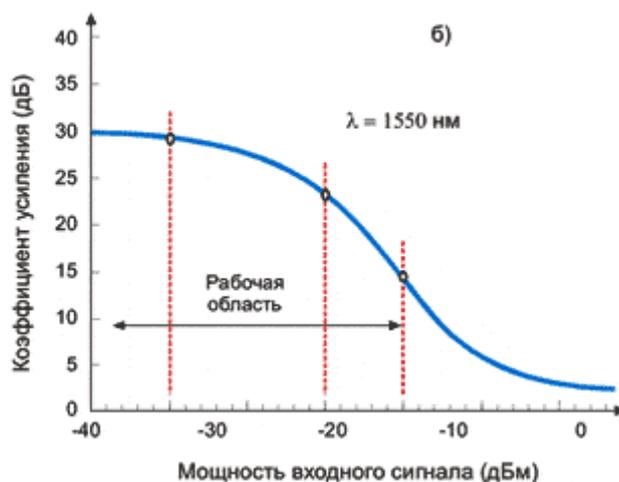


Рис. 2.5. б - Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм.

Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам ATM или компонентам протокола IP – не опасаясь, что они мешают 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

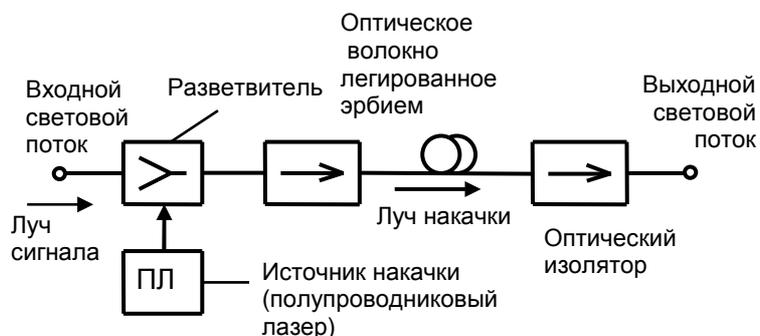
Emission). Сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети. Каждая линия связи уровня ОС-48 (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.

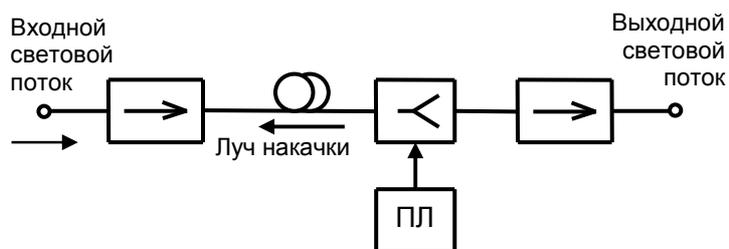
Усилитель EDFA, показанный на рисунок 2.6, состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного эрбием ( $Er^{3+}$ ), и подходящей накачки. Для подачи сигнала накачки в волокно требуется, по крайней мере, один разветвитель. Длина волны накачки может быть 980 или 1480 нм. Кроме этого ОУ 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

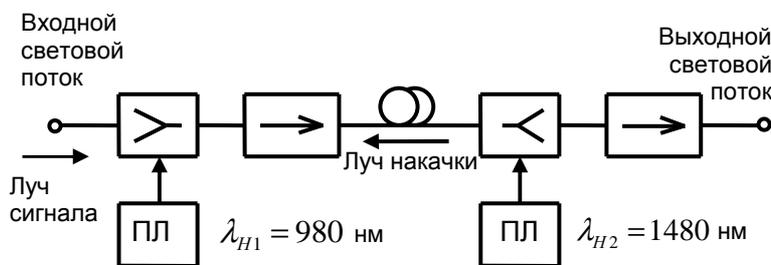
конфигурацией, если мощность сигнала мала по сравнению с уровнем насыщения. В режиме насыщения эффективность преобразования обычно больше при использовании противонаправленной накачки, главным образом благодаря тому, что основную роль играет усиленное спонтанное излучения (ASE). Если важно иметь низкий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



(а) Сонаправленная накачка



(б) Противонаправленная накачка



(в) Двунаправленная накачка

Рисунок 2.6 - Схемы использования усилителей типа EDFA.

Существует также двунаправленная 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

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

где  $P_{\text{СВХ}}$  и  $P_{\text{СВЫХ}}$  - 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.  $P_{\text{СПАДА}}$  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.

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

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)).

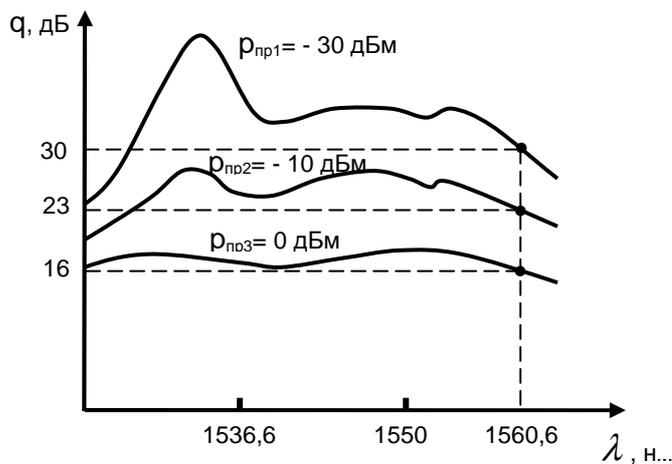


Рисунок 2.7 (а) - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности для усилителя Lucent 1713.

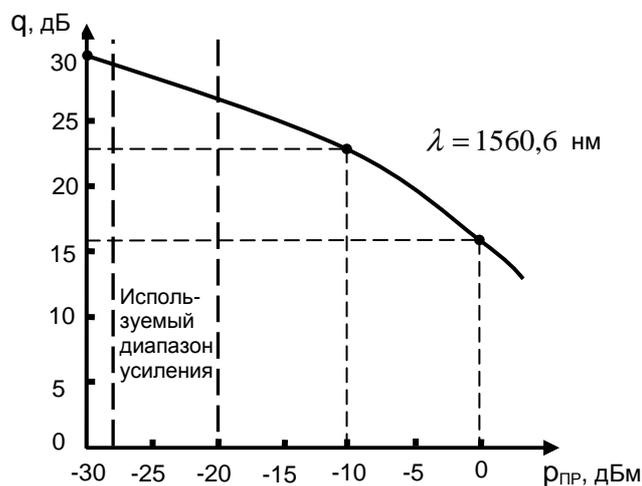


Рисунок 2.7 (б) - Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны для усилителя Lucent 1713.

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].

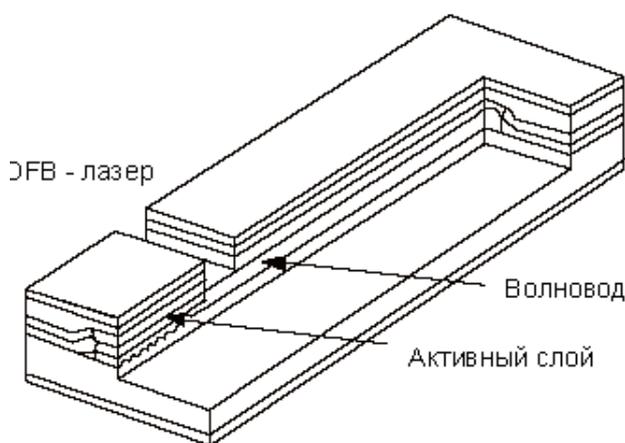


Рисунок 2.8 - Упрощенный вид кристалла DFB-лазера.

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- фото-диоды 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 фото-диодов 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.

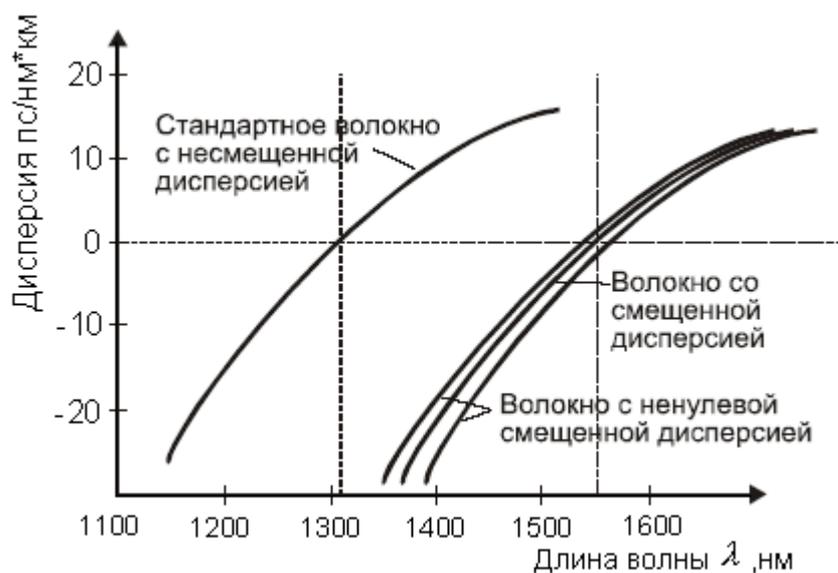


Рисунок 2.9 - Типичные значения дисперсии для различных типов оптических волокон.

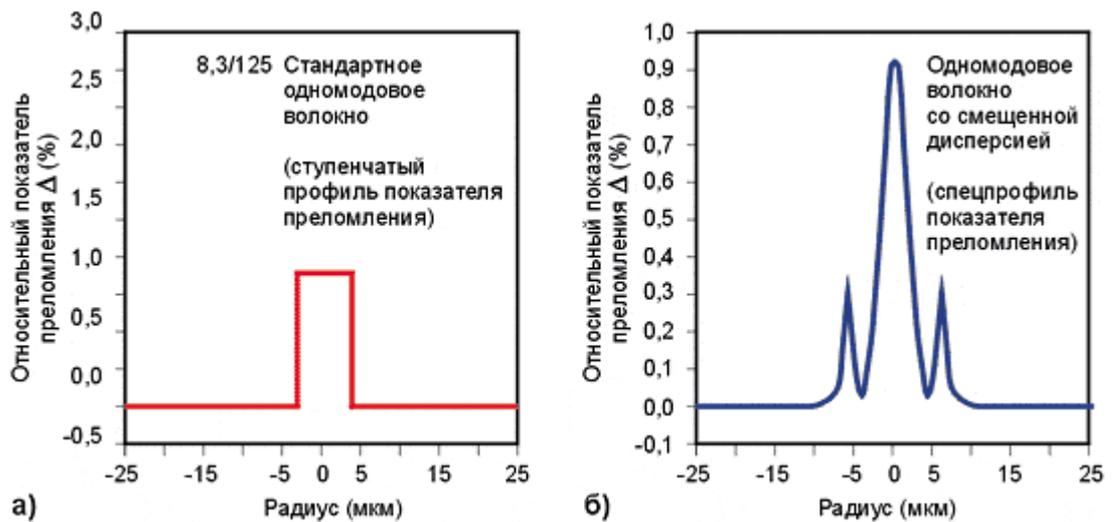


Рисунок 2.10 - Типичные профили коэффициента преломления для одномодовых оптических волокон.

### *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 определённом 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  $\Delta f_E$  - полоса пропускания электрического фильтра фотоприёмника.

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

$\Delta f_o$  - 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  $A_{зАП} = 5$  дБ.

$$A_3 = A'_3 + A_{зАП}. \quad (3.4)$$

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  $\alpha_K = 0,2 \left( \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right)$ .

Затухание разъёмного оптического соединителя [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) [7]

$$A_{CB} = 0,03 \text{ (дБ)}.$$

Строительная длина кабеля составляет  $l_{CTP} = 2 \text{ км}$ .

Кроме того, на регенерационном участке, ввиду большой его протяжённости (порядка 700-1000 км), и достаточно большим значением дисперсионного параметра  $D = 18 \text{ пс/нм/км}$  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  $\Delta \lambda = 0,1 \text{ (нм)}$ ,

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  $B = 2,5 \text{ Гбит/с}$ , 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  $\alpha = 1,56$  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

$$L_{yc} = \frac{q + \alpha_{кд} \cdot \frac{L_{yc} \cdot D_1}{D_2} - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТР}}};$$

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

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

В рассматриваемом курсовом проекте используется усилитель Lucent с минимальной мощностью входного сигнала  $p_{\text{ПРМИН}} = -30$  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:

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

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

$$q = 29,6 \text{ (дБ)}.$$

Таким образом, мощность сигнала на выходе оптического усилителя составляет:

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

Подставим полученные значения, получаем

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

Воспользовавшись формулой (3.8) имеем

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

$$L_{\text{УС}} = 96 \text{ (км)}.$$

### 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  $p_{\text{Ш.ВХ}}$ , 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);

$\nu$  – 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  $\nu$ , 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:

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

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

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

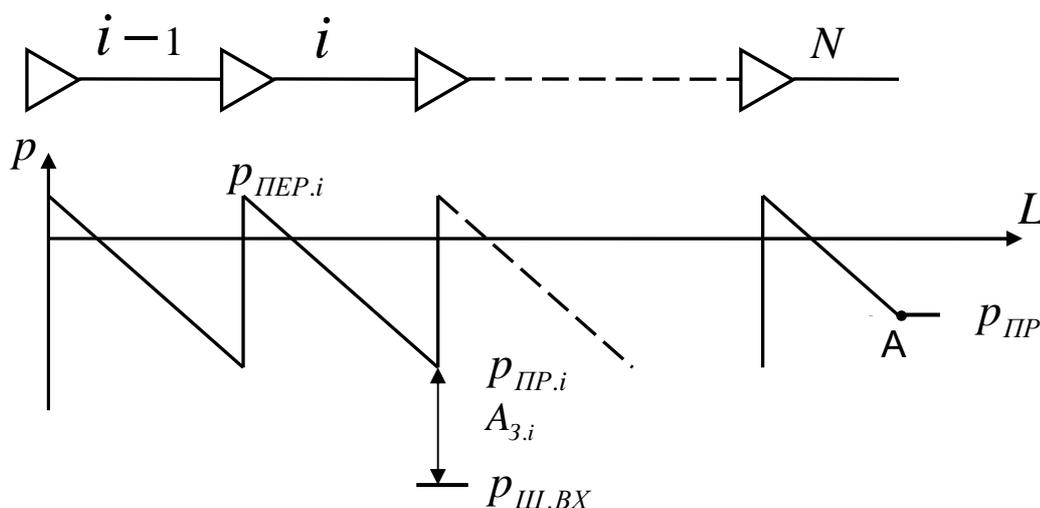


Рисунок 3.1 - Диаграмма уровней.

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

$$A'_{3,i} = P_{ПР} - P_{ш,i}, \quad (3.16)$$

где  $P_{ш,i}$  – уровень шума от  $i$ -го усилительного участка.

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

Защищенность в точке А составляет:

$$A_{3,A} = p_{ПР} - p_{ш,\Sigma}$$

Подставим в данное выражение формулу (3.20)

$$\begin{aligned} A_{3,A} &= p_{ПР} - 10 \cdot \lg N - p_{ПР} - p_{Ш.ВХ} + p_{ПЕР} - \alpha \cdot l; \\ A_{3,A} &= p_{ПЕР} - 10 \cdot \lg N - p_{Ш.ВХ} - \alpha \cdot l. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Формулу (3.21) можно преобразовать, воспользовавшись связью усиления в усилителе с длиной участка  $l$  между усилителями и удельного затухания

участка  $\alpha$ , и связью количества усилительных участков с длиной регенерационного участка  $L$ , и усилительного участка  $L_{yc}$ .

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

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

Таким образом, формула (3.21) примет вид

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

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 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети

Рассмотрим подробно вариант курсового проекта где необходимо разработать участок транспортной сети, которая 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 дипломном проекте 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.

Полные описания систем Lambda Driver 1600, а также ее технические характеристики представлены в разделе (7.1).

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).

Полное описание аппаратуры - WaveStar® ADM 16/1 систем представлено в разделе (7.2).

На проектируемом участке транспортной сети расстояние между городами Москва и Челябинск 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 дипломном 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

$$P_{\text{ПРМИН}} = -30 \text{ дБм.}$$

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  $A_{\text{ЗАП}} = 2$  (дБ).

## 4.2 Проектирование участка транспортной сети Москва - Чебоксары

### 4.2.1 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

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

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

Максимальное расстояние усилительного участка определяется по формуле:

$$L_{УСМАКСi} = \frac{\mathcal{E}_i - A_P \cdot n_P}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТP}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2}}. \quad (4.2)$$

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

Соответственно максимальное расстояние первого усилительного участка

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

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

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  $L_{УС1} = 72$  км.

Затухание, вносимое усилительным участком, определяется по формуле:

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

То есть, вносимое затухание первым усилительным участком

$$A_1 = L_{УС1} \cdot \left( \alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{СТP}} - \frac{\alpha_{КД} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

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

Уровень мощности на выходе  $i$ -того участка:

$$P_{ПРi} = P_{ПЕРi-1} - A_i. \quad (4.4)$$

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.):

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

Таким образом, при  $p_{\text{ПР1}} = -27,4$  (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)

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

Применимо к первому усилительному участку

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

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

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

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

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

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

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

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

$$L_{\text{УС2}} = 99 \text{ (км)};$$

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

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

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

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

При  $P_{\text{ПР2}} = -27,4$  (дБм);

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

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

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

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

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

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

$$L'_{\text{УС3}} = 20 \text{ (кМ)}.$$

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

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

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

$$P'_{\text{ПР3}} = P_{\text{ПЕР2}} - A'_3;$$

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

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

$$p'_{ПЕР2} = p'_{ПР2} - A_{ОАДМ};$$

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

$$\mathcal{E}'_3 = p_{ПРМИН} + p'_{ПЕР2} - A_{3АП};$$

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

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

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

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);

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

$$p_{ПЕР3} = p_{ПР3} + q_3;$$

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

$$\mathcal{E}_4 = p_{ПРМИН} + p_{ПЕР3} - A_{3АП};$$

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

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

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

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

$$L_{УС4} = 98 \text{ (км)};$$

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

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

$$p_{ПР4} = p_{ПЕР3} - A_4;$$

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

При  $p_{ПР4} = -27,6$  (дБм);

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

$$p_{ПЕР4} = p_{ПР4} + q_4;$$

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

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

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

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

$$L_{УСМАКС5} = \frac{29,4 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 95 \text{ (км)}.$$

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

$$L_{УС5} = 65 \text{ (км)}.$$

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

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

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

$$P'_{ПР5} = P_{ПЕР4} - A_5;$$

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

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

$$P_{ПР5} = P'_{ПР5} - A_{OADM};$$

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

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

$$L_{УС8} = 58 \text{ (км)};$$

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

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

$$P_{\text{ПР8}} = P_{\text{ПЕР7}} - A_8;$$

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

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 4.1.

Табл. 4.1. Основные параметры ВОЛС Москва – Чебоксары

Населенный пункт	Москва	Элект-рогорск	Хряс-тово	Влади-мир	Дмит-риево
№ У.У.	—	1	2	3	
$L_{\text{УС}}$ (км)	—	72	99	79	
$L$ (км)	—	72	99	20	59
$A$ (дБ)	—	22,4	29,5	5,3	20,3
$P_{\text{ПР}}$ (дБм)	—	-27,4	-27,4	-3,2	-28
$P_{\text{ПЕР}}$ (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
$L_{\text{УС}}$ (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
$P_{\text{ПР}}$ (дБм)	-27,6	-22,9	-26,9	-26,7	15,4
$P_{\text{ПЕР}}$ (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.4.1

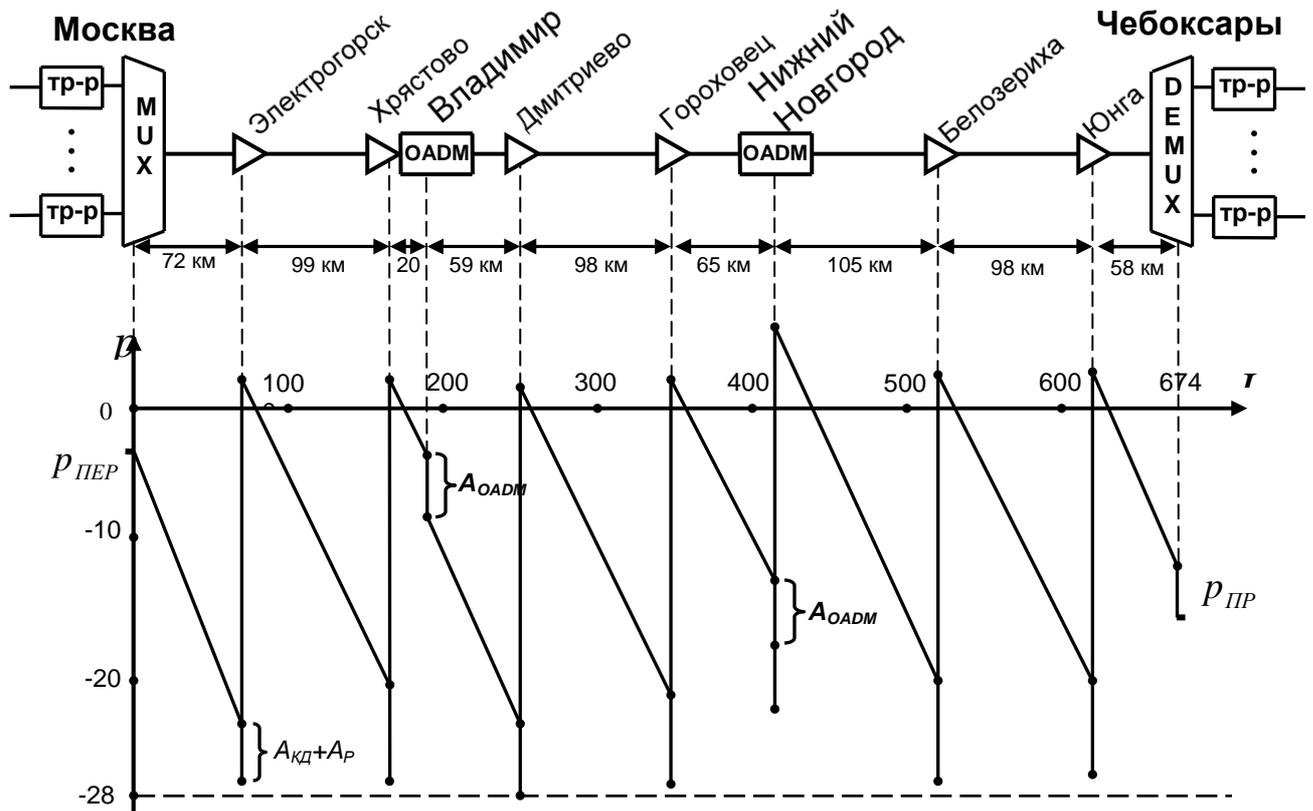


Рис.4.1 - Схема организации связи и диаграмма уровней ВОЛС Москва – Чебоксары

#### 4.2.2 Проектирование обратного направления (Чебоксары - Москва)

Проектирование обратного направления производится аналогично прямому.

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

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

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

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

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

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

$$L_{\text{VCI2}} = 98 \text{ (км)};$$

$$A_2 = L_{\text{VCI2}} \cdot \left( \alpha_K + \frac{A_{\text{CB}}}{l_{\text{СТР}}} - \frac{\alpha_{\text{КД}} \cdot D_1}{D_2} \right) + A_P \cdot n_P;$$

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

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

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

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 аттенуатор 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  $L_{УС6} = L'_{УС6} + L''_{УС6}$  )

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

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

$$P'_{ПР6} = P_{ПЕР6} - A'_6;$$

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

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.

$$L_{УС7} = 99 \text{ (км)};$$

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

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

$$P_{ПР7} = P_{ПЕР6} - A_7;$$

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

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

$$L_{УС8} = 72 \text{ (км)};$$

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

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

$$P_{ПР8} = P_{ПЕР7} - A_8;$$

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

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 4.2.

Табл. 4.2. Основные параметры ВОЛС Чебоксары – Москва

Населенный пункт	Чебоксары	Юнга	Белозериха	Н. Новгород	Гороховец
№ У.У.	—	1	2	3	4

$L_{\text{УС}}$ (км)	—	58	98	105	65
$L$ (км)	—	58	98	105	65
$A$ (дБ)	—	18,3	29,5	32,5	20,3
$P_{\text{ПР}}$ (дБм)	—	-23,3	-23,9	-27,7	-27,4
$P_{\text{ПЕР}}$ (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	Электророгорск	Москва
№ У.У.	5	6		7	8
$L_{\text{УС}}$ (км)	98	79		99	72
$L$ (км)	98	59	20	99	72
$A$ (дБ)	29,2	13,7	11,9	29,5	22,4
$P_{\text{ПР}}$ (дБм)	-27,4	-11,6	-28	-27,9	-20,7
$P_{\text{ПЕР}}$ (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.4.2.

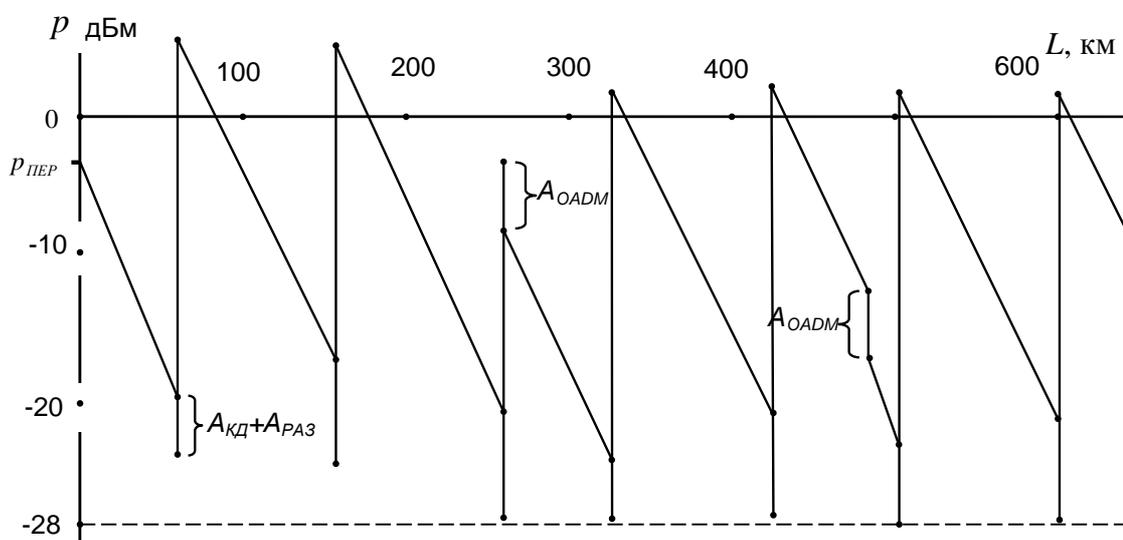


Рис.4.2 - Диаграмма уровней ВОЛС Чебоксары – Москва

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.

### 4.3 Определение помехозащищенности спроектированного участка транспортной сети

Определим помехозащищенность прямого направления.

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

$$A_{3,i} = p_{ПР,i} - p_{Ш.ВХ},$$

где  $p_{ПР,i}$  – 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:

$$P_{Ш,i} = 10^{0,1 \cdot (P_{ПР} - A_{3,i})} \text{ (мВт)}, \quad (4.7.)$$

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

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

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

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

Суммарный уровень помех

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

Защищенность сигнала в точке А определяется как

$$A'_3 = p_{ПР} - p_{ш.Σ}.$$

То есть защищенность сигнала для прямого направления участка транспортной сети составляет

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

Определим суммарную мощность помех приведенную к точке А для обратного направления

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

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

Суммарный уровень помех

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

Защищенность сигнала в точке А составляет

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

Таким образом, минимальная помехозащищенность будет не ниже

$$A_{з.сети} = 16,5 \text{ (дБм)}.$$

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  $K_r$ , характеризующий относительное время нахождения объекта в исправном

состоянии

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

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  $K_{\Pi}$ , характеризующим относительное время нахождения объекта в неисправном состоянии

$$K_{\Pi} = \frac{T_B}{T + T_B} = 1 - K_{\Gamma}. \quad (5.2)$$

Еще одним параметром надежности является интенсивность отказов  $\lambda$ , 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  $\Lambda$  и коэффициент простоя  $K_{\Pi}$  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  $\lambda_i$  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  $m_{НУП1} = 0,06 ;$

- 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  $\lambda_{K1}$ , (1/ч·км).

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

-отказы УП за счет внешних повреждений, характеризующиеся интенсивностью  $\lambda_{УП1}$ , (1/ч).

$$\Lambda_{\Lambda} = \lambda_{K1} \cdot L_K + \lambda_{K2} \cdot n_{CD} + \lambda_{УП1} \cdot n_{УП}, \quad (5.6)$$

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

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

$$n_{CD} = \frac{L_K}{l_{CD}}, \quad (5.7)$$

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

$$n_{CD} = \frac{674}{2} = 337.$$

Среднее количество отказов  $\lambda_{K1}$  на один километр за один час определим воспользовавшись значениями представленными в разделе (5.3.)

$$\lambda_{K1} = \frac{0,29}{100 \cdot 8765} = 3,3 \cdot 10^{-7} \left( \frac{1}{ч} \right).$$

Интенсивность отказов одной строительной длины кабеля:

$$\lambda_{K2} = \frac{1}{3225000} = 3,1 \cdot 10^{-7} \left( \frac{1}{ч} \right).$$

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

$$T_{вл} = 7,2 \text{ (ч)};$$

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

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

#### 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.

$$\begin{aligned} \lambda_{оп} &= 2 \cdot (\lambda_M + \lambda_{дм} + \lambda_{ип} + \lambda_{му} + \lambda_{тр} + \lambda_{мп} + \lambda_{ус}) = \\ &= 2 \cdot \left( \frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_{дм}} + \frac{1}{T_{ип}} + \frac{1}{T_{му}} + \frac{1}{T_{тр}} + \frac{1}{T_{мп}} + \frac{1}{T_{ов}} \right) \quad (5.9). \end{aligned}$$

Подставив в данную формулу показатели надежности 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:

$$K_{Г}^{оп} = \frac{T_A^{оп}}{T_A^{оп} + T_B^{оп}}; \quad (5.11)$$

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

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

$$K_{Г}^{оп} = \frac{4916}{4916 + 0,5} = 0,99999;$$

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

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:

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

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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

Коэффициенты готовности и простоя для УП:

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

$$K_{\Pi}^{УП} = \frac{T_B^{УП}}{T_A^{УП} + T_B^{УП}} = 1 - K_{\Gamma}^{УП}. \quad (5.20)$$

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

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

$$T_B^{УП} = 1 \text{ (ч)};$$

$$K_{\Gamma}^{УП} = \frac{3077}{3077 + 1} = 0,99968;$$

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

Суммарная интенсивность отказов аппаратуры:

$$\Lambda_A = \lambda_{OII} + \lambda_{II}^{PIBB} + \lambda_{VII}; \quad (5.21)$$

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

Коэффициент простоя аппаратуры рассчитаем по формуле (5.5):

$$K_{IIA} = K_{II}^{OII} + K_{II}^{PIBB} + K_{II}^{VII}; \quad (5.22)$$

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

Коэффициент готовности аппаратуры:

$$K_{GA} = 1 - K_{IIA}; \quad (5.23)$$

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

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

Коэффициент готовности спроектированного участка транспортной сети:

$$K_{GC} = 1 - K_{IIA} - K_{IIA}; \quad (5.24)$$

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

При определении требуемого показателя надёжности 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 ( $K_{Г.1}^{ПЕРСП} = 0,999$ ), 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.

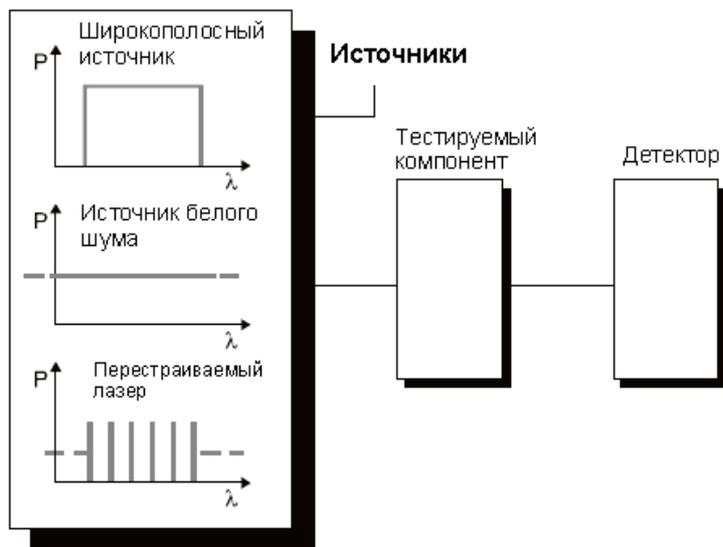


Рисунок 6.1 - Измерительная установка с идеальными источниками излучения.

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.

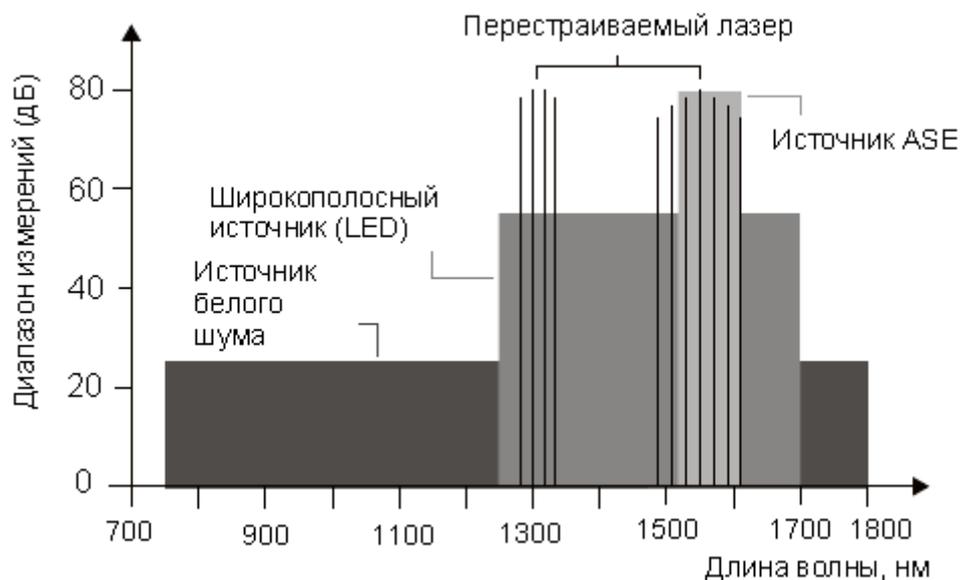


Рисунок 6.2 - Спектральная область излучения и динамический диапазон источников различных типов.

### 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 стандартном 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.

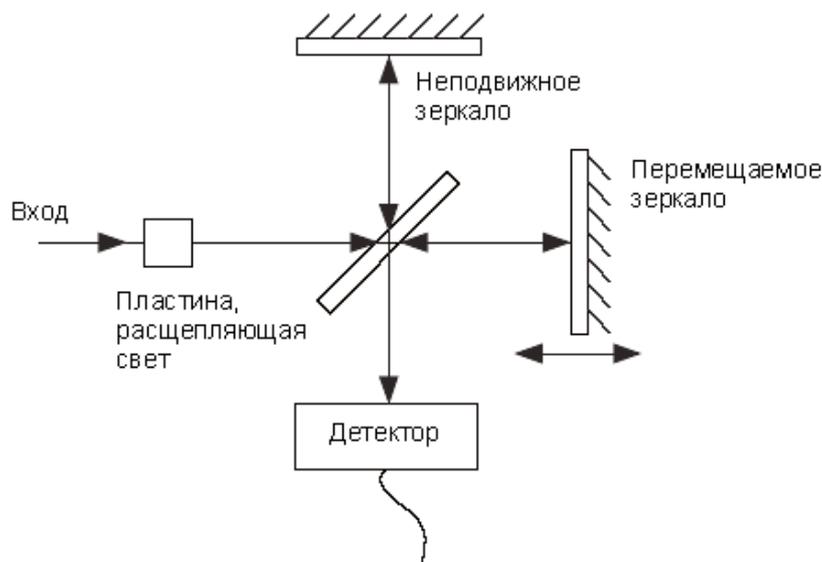


Рисунок 6.3, а - В интерферометрическом методе для интерференции двух пучков света используется перемещаемое зеркало.

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.

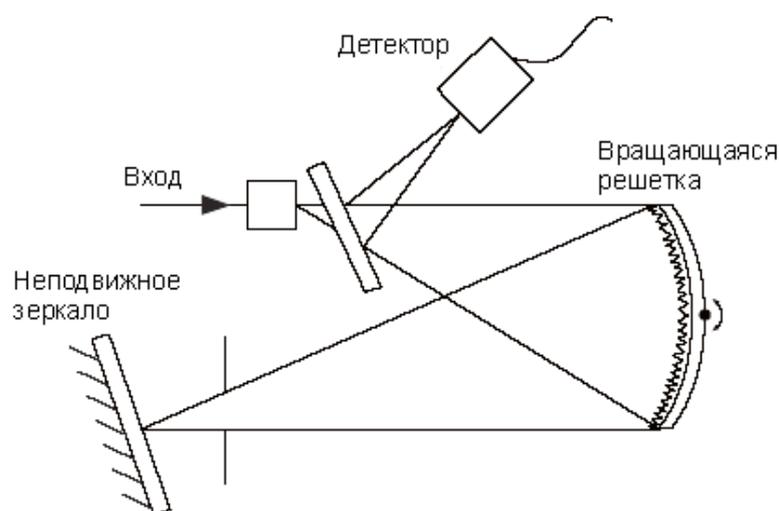


Рисунок 6.3, б. Вращающаяся дисперсионная решетка отражает на зеркало излучение с разными длинами волны в зависимости от угла поворота.

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.

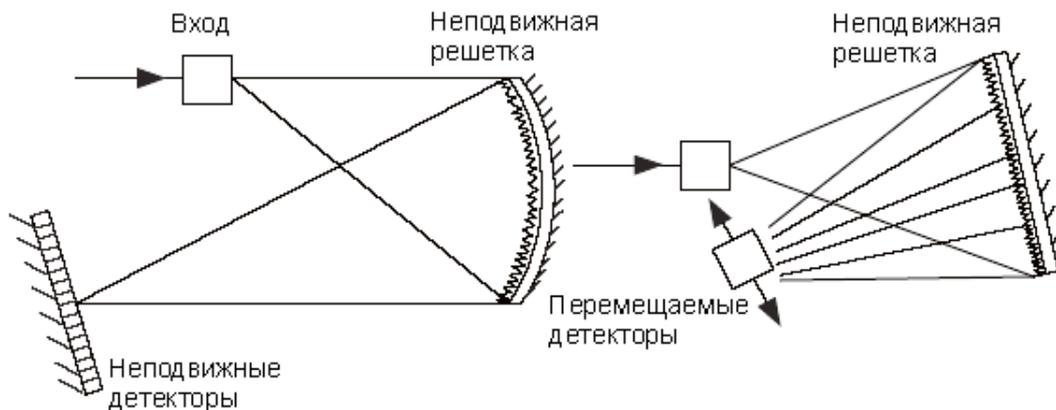


Рисунок 6.3, в - Фиксированная решетка разделяет входной пучок на спектральные составляющие, которые затем попадают на детекторы.

- 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 собой 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 необходимые 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.

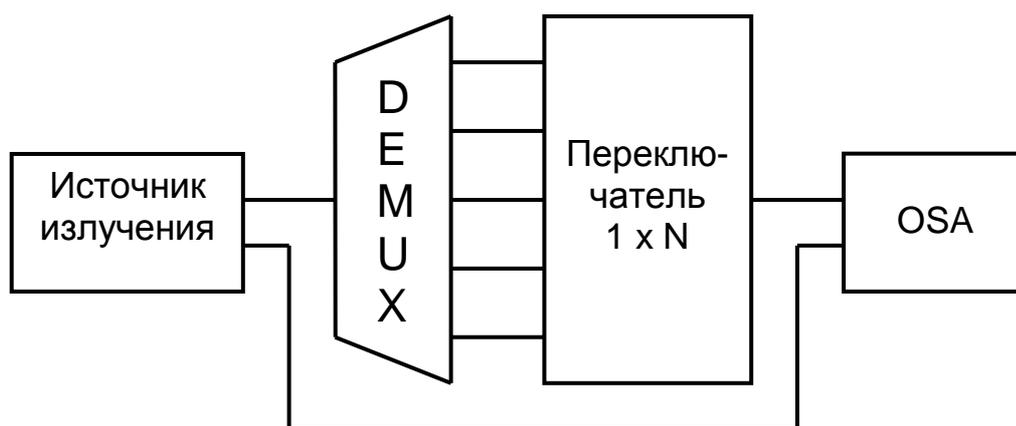


Рисунок 6.4 - Установка для определения вносимых потерь мультиплексора/демультиплексора.

#### *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.

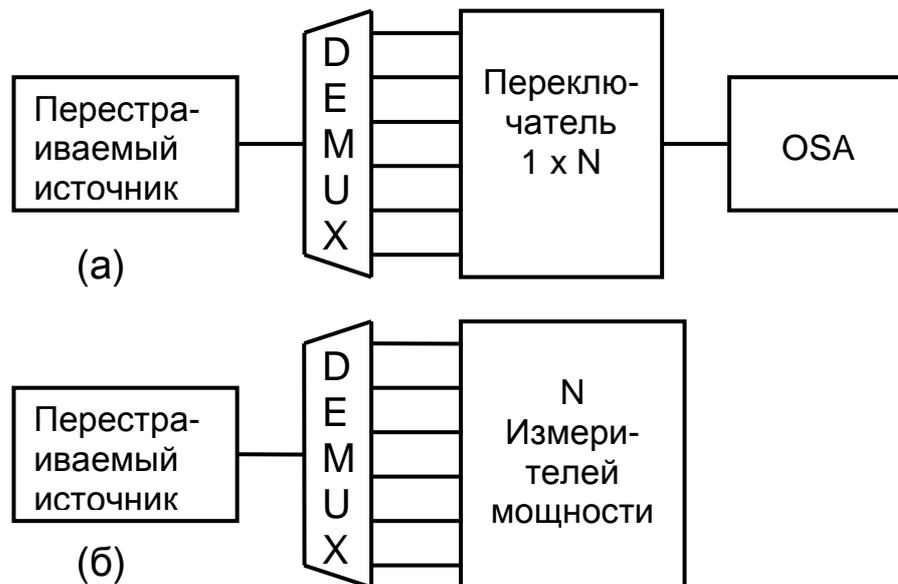


Рисунок 6.5 - Измерение перекрестных помех с помощью:

- 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.

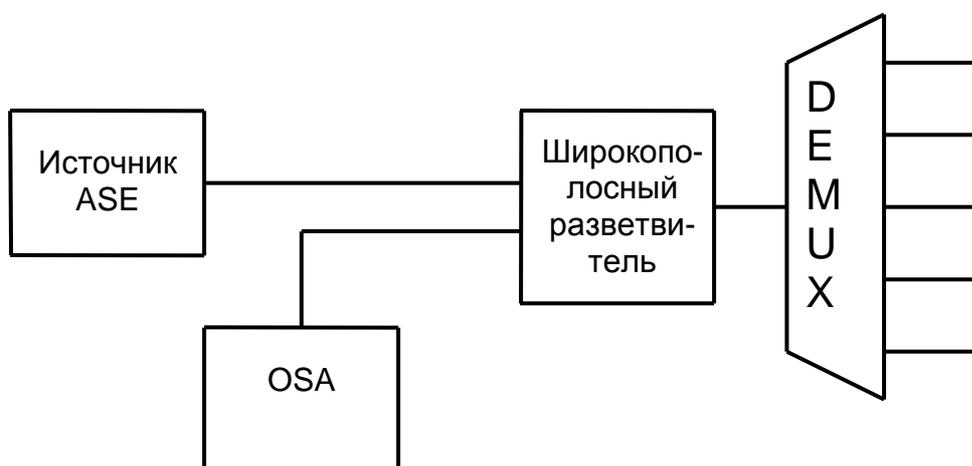


Рисунок 6.6 - Измерение зависимости ORL от длины волны.

#### *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.

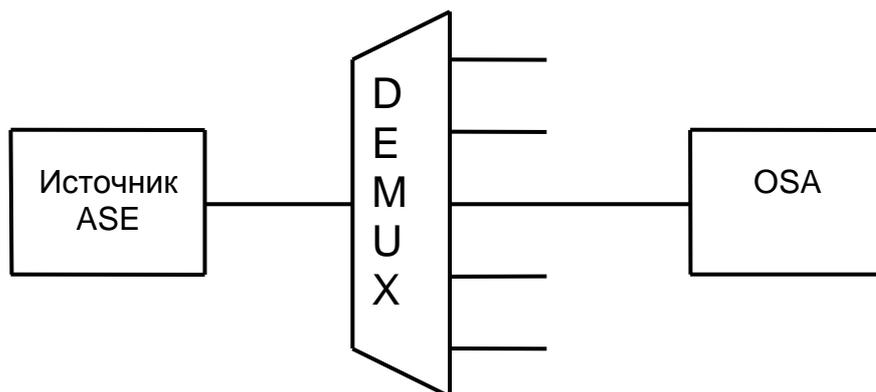


Рисунок 6.7 - С помощью простой схемы измерений, использующей источник ASE и анализатор OSA, определяют характеристики полосы пропускания.

#### 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  $1 \times 4$ .

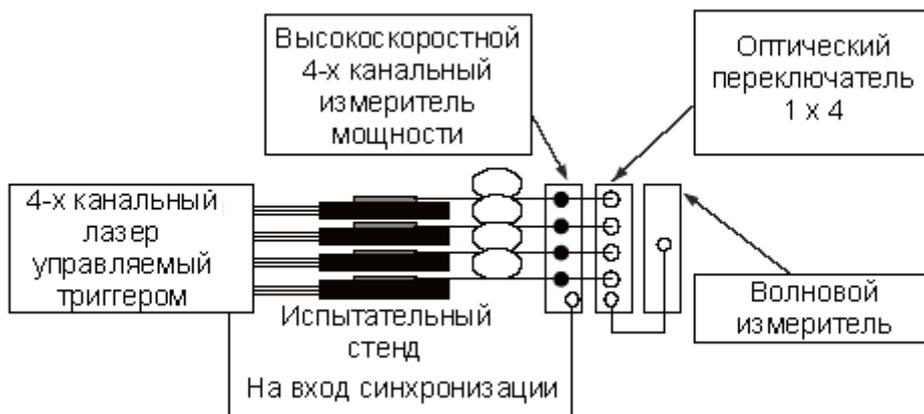


Рисунок 6.8 - Измерение характеристик лазерного источника.

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.

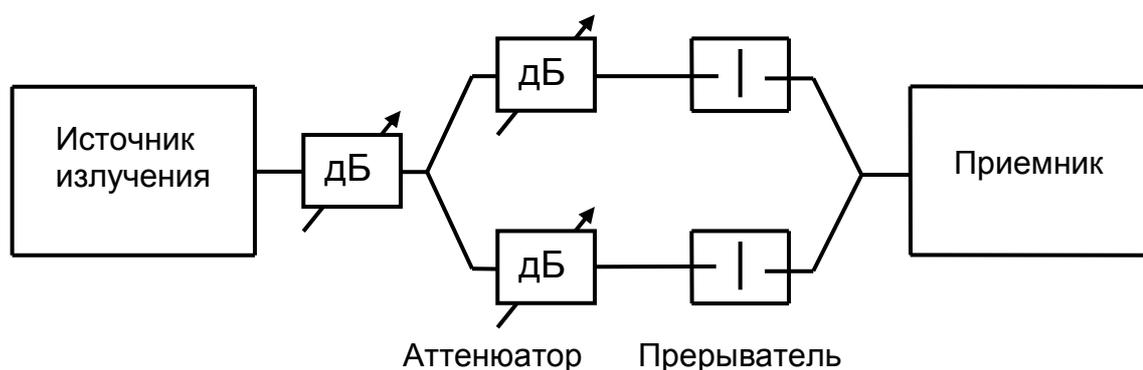
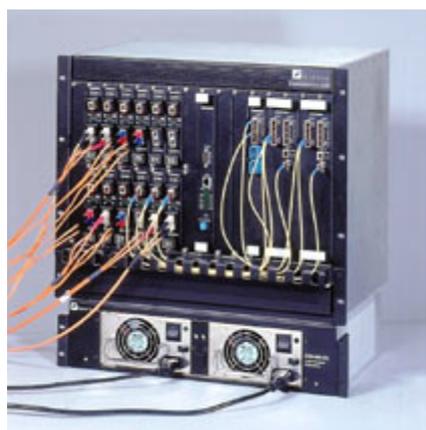


Рисунок 6.9 - Автоматизированная схема определения временных характеристик и чувствительности приемника.

## 7 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ АППАРАТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

### 7.1 Система 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.

Рисунок 7.1 - Внешний вид системы Lambda Driver 1600.

Система Lambda Driver обеспечивает прозрачную передачу нескольких независимых потоков данных по оптическому волокну. Lambda Driver позволяет од-новременнo мультиплексировать по длинам волн потоки SDH, ATM, Fast/Gigabit Ethernet, Fibre Channel и др. Имеется два вида шасси LambdaDriver (LD800 и LD1600). Оба вида шасси Lambda Driver используют одни и те же универсальные транспондеры.

Управление и мониторинг системой LambdaDriver 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 WDM имеет интерфейс к системе мониторинга оптического канала.

Типичной конфигурацией сети при использовании LambdaDriver является топология “точка-точка”. Реализация кольцевой топологии требует использования модулей мультиплексоров ввода/вывода в каждом из узлов кольца.

Система LD 1600 имеет полностью модульную архитектуру и состоит из компактного шасси, монтируемого в стойку, и набора модулей, поддерживающих режим горячей замены. В шасси LD 1600 устанавливаются различные модули мультиплексоров/демультиплексоров для работы на 4,8 или 16 длинах волн. Такая гибкость дает операторам возможность снизить начальные вложения – сначала приобрести систему, работающую с несколькими длинами волн, а затем модернизировать ее по мере необходимости.

Шасси 1600 в типичной конфигурации содержит следующие модули:

- Модуль мультиплексора WDM;
- Модуль демультиплексора WDM;

- Модуль управления;
- От 1 до 16 транспондеров;
- Два источника питания;
- Модуль резервирования 1+1 или сервисный модуль;
- Модуль оптического усиления.

#### Технические характеристики LD1600

##### Производительность:

- Скорости передачи данных в каждом канале от 100 Мбит/с до 2,5 Гбит/с
- Масштабирование от 1 до 8/16 каналов в “горячем” режиме
- Общая пропускная способность до 20 Гбит/с (8 x 2,5 Гбит/с)
- WDM (LD1600): длины волн согласно ITU от 1536,61 до 1560,61 нм с шагом 200

ГГц (1,6 нм)

- Скорость переключения между основным и резервным каналами < 6 мс.

##### Резервирование:

- Возможность резервирования канала WDM/DWDM (1+1)
- Возможность установки дополнительного модуля управления
- Два источника питания.

##### Управление:

- SNMP: Система управления MegaVision или другое SNMP-совместимое ПО

- Локальное управление через порт RS-232 (разъем DB9)
- Удаленный доступ по сети Ethernet 10/100 Мбит/с (разъем J-45) по протоколу

Telnet

- Канал управления OSC:100 Мбит/с (Fast Ethernet с оптическим интерфейсом 1310 нм).

Приложения:

- Fast Ethernet
- Gigabit Ethernet
- ATM
- STM-1
- STM-4
- STM-16
- Fibre Channel
- любые другие протоколы.

Оптические параметры WDM (LD1600):

- Выходная мощность (с резервированием): -5 дБм
- Выходная мощность (без резервирования): -0,7 дБм
- Динамический диапазон приемника при 1,25 Гбит/с: от -3 до -29 дБм
- Динамический диапазон приемника при 2,5 Гбит/с: от -3 до -25 дБм
- Динамический диапазон приемника OADM от -3 до -20 дБм

Таблица. 7.1. - Канальный план используемый в аппаратуре Lambda Driver

1600

№ канала	Номинальная центральная частота (ТГц)	Номинальное значение длины волны (нм)
1	195,1	1536,61
2	194,9	1538,19
3	194,7	1539,77
4	194,5	1541,35
5	194,3	1542,94
6	194,1	1544,53
7	193,9	1546,12

8	193,7	1547,72
9	193,5	1549,32
10	193,3	1550,92
11	193,1	1552,52
12	192,9	1554,13
13	192,7	1555,75
14	192,5	1557,36
15	192,3	1558,98
16	192,1	1560,61

## 7.2 Терминальный мультиплексор SDH компании «Lucent Technologies» WaveStar® ADM 16/1

Краткое описание:



Интеллектуальный мультиплексор и 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).

Рисунок 7.2 - Внешний вид ADM 16/1.

Одной из главных функциональных возможностей WaveStar® ADM 16/1 является ввод/вывод и гибкая кросс-коммутация потоков 2 Мбит/с непосредственно из STM-16. Кроме того, устройство позволяет подключать потоки 34, 45, 51, 140, 155 и 620 Мбит/с. Поддерживаются механизмы защиты SNCP, MSP, MS-SPRing, DNI. В целях сокращения затрат времени на установку и тестирование данный мультиплексор может поставляться с заранее выполненными кабельными соединениями.

Основные характеристики:

- Суммарная пропускная способность ввода/вывода: до 1008 потоков 2 Мбит/с или до 36 потоков STM-1
- Защита: MS-SPRing, SNCP, MSP и DNI;
- Возможность кросс-коммутации VC-4, VC-3 и VC-12
- Единая платформа для применения в сетях STM-16, STM-4 и STM-1
- Единый сетевой элемент для соединения колец STM-16, STM-4 и STM-1
- Поддержка широкого спектра применений: мультиплексор ввода/вывода, оконечный мультиплексор, локальный кросс-коннектор
- Поддержка протокола сообщений синхронизации ETSI
- Преобразование интерфейсов AU-3/TU-3
- Возможность комбинирования различных типов полезной нагрузки
- Интегрированный оптический усилитель и предусилитель
- Удаленное обслуживание и управление с помощью системы сетевого управления Lucent Technologies Navis™ ONMS
- Компактная независимая конструкция, простота установки
- Резервирование ключевых блоков.

### **7.3 Оптический усилитель на волокне, легированном эрбием**

(Усилитель EDFA) компании «Lucent Technologies» Lucent 1713

EDFA - оптический усилитель на волокне, легированном эрбием. Оптический усилитель состоит из легированного эрбием оптического волокна и высоко-надежного 980/1480nm лазера накачки, обеспечивающего высокий уровень усиления и низкие шумы. Содержит RS485 управляющий интерфейс. Это серия оптических усилителей, построенных с использованием новейших технологий и обладающих высочайшими техническими характеристиками. Они характеризуются высоким коэффициентом усиления, непревзойденными шумовыми параметрами, равномерной спектральной характеристикой, низкой поляризационной зависимостью и высоким уровнем насыщения.



Рисунок 7.3 - Внешний вид оптического усилителя Lucent 1713.

Основные параметры оптического усилителя:

- Диапазон скоростей модулирующего сигнала: 0,6 – 2,5 Гбит/с
- Диапазон усиливаемых длин волн: 1530 – 1565 нм
- Чувствительность в режиме линейного усилителя и предусилителя на длине волны 1560,6 нм: -30 дБм
- Коэффициент малосигнального усиления: 30 дБ
- Коэффициент усиления на длине волны 1560,6 нм при мощности входного сигнала -10 дБм: 23 дБ
- Диапазон усиливаемых входных сигналов на длине волны 1560,6 нм в режиме бустера: > 0 дБм
- Выходная мощность в режиме бустера: 16 дБм
- Поляризационная чувствительность: 0,2 – 0,5 дБ
- Волновая чувствительность : 0,6 – 1,5 дБ
- Температурная чувствительность: 0,4 – 1 дБ
- Типичный уровень шума: 5,5 дБ
- Диапазон рабочих температур: 0 - +65 С
- Максимальная потребляемая мощность: 30 Вт
- Размеры: 250x100x260.

## 7.4 Одномодовый оптический кабель компании «Москабель-Фуджикура»

В качестве кабеля, используемого в проектируемом участке магистральной сети будем использовать кабель производства компании «Москабель-Фуджикура» типа A-Db2Y. Произведем маркировку.

Так как кабели производства «Москабель-Фуджикура» маркируются по германскому национальному стандарту DIN VDE 0.888 (часть 3), то маркировка будет в этом же стандарте:

A-Db2Y 2/4 E 9/125 0,4/0,2 F/H 3,5/5,3 (1,0)

Пояснение: А – кабель наружной прокладки

D – модуль с наполнителем и пучком волокон в трубке со свободной укладкой

b2Y – броня с ПЭТ защитной оболочкой

2/4 – число пучков/число волокон в пучке

E – одномодовое волокно

9 – диаметр поля моды

125 – диаметр оболочки

0,4/0,2 – затухание на рабочей длине волны 1310/1550 нм, дБ/км

F/H – рабочая длина волны 1310/1550 нм

1,0 – допустимое растягивающее усилие (не обязательно)

Кабель имеет 8 оптических волокон (4x4) стандарта G.652. Используются 2 волокна, остальные 6 сдаются в аренду.

Параметры одномодового ОВ по стандарту МСЭ-Т G.652:

- Тип волокна: SSF

- Диаметр оболочки:  $125 \pm 1$  мкм

- Рабочие окна прозрачности: 1310/1550 нм

- Затухание: в окне 1285-1330 (нм) -  $\leq 0,4$  дБ/км

в окне 1525-1565 (нм) -  $\leq 0,2$  дБ/км

- Прирост затухания при температурах -60 - +55/85° С:  $<0,05/0,05$

- Длина волны отсечки кабеля: 1260 нм

- Длина волны нулевой дисперсии: 1301 нм
- Значение дисперсии в окне 1550 нм: 18 пс/нм/км
- Эффективный групповой показатель преломления:
  - на длине волны 1310 нм – 1,4675
  - на длине волны 1550 нм – 1,4681
- Числовая апертура: 0,13
- Параметр динамической усталости:  $\geq 20$
- Усилие стягивания покрытия: 3,2 н.

## **7.5 Волокно для компенсации дисперсии компании «Москабель-Фуджикура»**

В качестве кабеля, используемого для компенсации дисперсии, используется волокно DCF компании «Москабель-Фуджикура» 15DC - 340

Основные параметры волокна:

- Дисперсия волокна: - 340 пс/нм/км
- Наклон дисперсии:  $< 0,366$  пс/нм\*нм
- Вносимое затухание: 1,56 (дБ/км)
- Эффективность волокна:  $>180$  (пс/нм/дБ)
- Среднее значение PMD: 1 (пс).

## **8 РАЗРАБОТКА ВОПРОСОВ ПО ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **8.1. Техника безопасности при наладке и монтаже оборудования**

В производственных помещениях должны быть приняты необходимые меры по обеспечению безопасности персонала при монтаже, наладочных испытаниях и в процессе эксплуатации оборудования в отношении механических травм, поражения электрическим током, лазерным излучением, ядовитыми и вредными химическими веществами. Безопасность должна обеспечиваться рациональной конструкцией и режимом функционирования

оборудования, а также наличием предупреждающих надписей, знаков безопасности и указанием правильных методов работы в инструкции по эксплуатации.

В аппаратуре STM должно быть предусмотрено автоматическое отключение лазера при попадании входного сигнала на оптический стык в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.958.

В аппаратуре STM должно быть предусмотрено автоматическое ограничение уровня мощности оптического излучения передатчика до предельно допустимого уровня для лазера используемого класса при разъединении или обрыве оптического волокна при передаче в соответствии со стандартом МЭК.

Токоведущие элементы должны быть защищены от случайного прикосновения. Аппаратура STM должна быть заземлена относительно общего контура заземления для предотвращения попадания обслуживающего персонала под пробивное напряжение. Величина заземления между клеммами защитного заземления и любой металлической нетоковедущей частью аппаратуры, доступной для прикосновения, не должна превышать 0.1 Ом.

Крепления заземляющей клеммы и проводников должны быть зафиксированы от случайного развинчивания. Место присоединения заземляющего проводника должно быть обозначено нестираемым при эксплуатации знаком заземления. Вокруг клеммы заземления должна быть контактная площадка для присоединения проводника. Площадка должна быть защищена от коррозии или изготавливаться из антикоррозийного материала и не должна иметь поверхностной окраски.

Сопротивление изоляции для цепей первичного питания по отношению к каркасу должно быть не менее:

20 МОм – в нормальных климатических условиях;

5 МОм – при повышенной температуре;

1 МОм – при повышенной влажности.

Изоляция относительно корпуса незаземленных цепей первичного электропитания с номинальным напряжением до 60 В должна выдерживать испытания:

500 В – в нормальных климатических условиях

300 В – в условиях повышенной влажности.

На аппаратуре должны быть нанесены требуемые знаки безопасности и предупреждающие знаки. Знаки должны быть расположены с таким расчетом, чтобы они были хорошо видны и не отвлекали внимание работающих.

Обслуживающий персонал должен учитывать вероятность лазерного излучения в любой точке волоконно-оптической системы связи. Она определяется уровнем оптического излучения, который может быть излучен в достаточно вероятных случаях:

- обрыв волоконного кабеля;
- разъединение оптического соединителя;
- ошибка оператора или нарушение правил ТБ при эксплуатации.

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

Каждый оптический соединитель должен быть отмечен меткой или лентой, если степень опасности в месте его установки превышает 1-й уровень опасности. Метка или лента должны быть желтого цвета с предупреждающей биркой.

Перед работами на любом оптическом кабеле или системе персонал должен проверить режим работы системы и уровень его опасности. В случае, если система смонтирована и включена, необходимо обозначить специальной предупреждающей маркировкой о соответствующем уровне опасности.

Персонал не должен смотреть на любой торец волокна, по которому передается излучение, или торец соединителя в точках с соответствующим уровнем опасности.

При производстве работ на открытых волокнах, соединителях и т.д. оборудование системы передачи или испытательное оборудование должно быть выключено, находиться в состоянии передачи малой мощности или

отсоединено. В этом случае непреднамеренное включение должно предотвращаться с помощью переключателя дистанционного управления или с помощью другого подходящего метода.

Замену блоков, отключение разъемов и осмотр монтажа в процессе настройки оборудования производить при отключенном напряжении питания.

При работе с оптическим волокном (ОВ), его отходы при разделке (сколе) необходимо собирать в отдельный ящик и после окончания монтажа освободить ящик в отдельно отведенном месте или закопать отходы в грунт. Следует избегать попадания остатков оптического волокна на одежду. Работу с ОВ следует проводить в клеенчатом фартуке.

Рабочее место и пол после разделки ОВ следует обработать пылесосом и затем протереть мокрой тряпкой, отжим тряпки следует производить в плотных резиновых перчатках.

При проведении испытаний мощности оптического излучения на выходе передающих устройств, присоединение измерителя мощности к оптическому соединителю передающего устройства производить при отключенном оптическом излучателе.

В оборудовании STM и в специализированных измерительных приборах оптические излучатели должны быть закреплены заглушками, если к ним не подключен ОК.

Монтаж оборудования, а также работы по профилактике и эксплуатации оборудования должны проводиться в строгом соответствии с правилами техники безопасности и в соответствии с требованиями рабочей документации, поставляемой фирмой.

## **8. 2. Роль освещения в создании здоровых условий труда**

Спектральный состав света влияет на производительность труда. Исследования показывают, что если выработку человека при естественном освещении принять за 100%, то при красном и оранжевом освещении она составляет лишь 76%. У людей, которые по каким-нибудь причинам частично

или полностью лишены естественного света, может возникнуть световое голодание. Освещение рабочих помещений должно удовлетворять следующим условиям:

- уровень освещенности рабочих поверхностей должен соответствовать гигиеническим нормам для данного вида работы;
- должны быть обеспечены равномерность и устойчивость уровня освещенности в помещении, отсутствие резких контрастов между освещенностью рабочей поверхности и окружающего пространства;
- в поле зрения не должно создаваться блеска источниками света и другими предметами;
- искусственный свет, используемый на предприятиях, по своему спектральному составу должен приближаться к естественному.

### **8. 3. Виды и системы освещения**

Освещение предприятий связи может быть естественным, искусственным и совмещенным.

*Естественное освещение* осуществляется через окна (боковое освещение), световые фонари (верхнее) или одновременно через фонари и окна (комбинированное). Нормирование естественного освещения производится с помощью коэффициента естественной освещенности (КЕО), выраженного в процентах.

Распределение КЕО внутри помещения неравномерно и зависит от расположения световых проемов.

При *совмещенном освещении* недостаточное естественное освещение дополняется искусственным.

*Искусственное освещение* по функциональному назначению делится на рабочее, дежурное, аварийное, эвакуационное и охранное.

*Рабочее освещение* создает необходимые условия для нормальной трудовой деятельности человека.

*Дежурное освещение* включается в рабочее время.

*Аварийное освещение* включается при отключении рабочего освещения. Светильники аварийного освещения питаются от автономного источника и должны обеспечивать освещенность не менее 5% величины рабочего освещения, но не менее 2 лк на рабочих поверхностях производственных помещений и не менее 1 лк на территории предприятия.

*Эвакуационное освещение* включается для эвакуации людей из помещения при возникновении опасности. Оно устанавливается в производственных помещениях с числом работающих более 50, а также в помещениях общественных зданий и вспомогательных зданий промышленных предприятий, если и них могут одновременно находиться более 100 человек. Освещенность в помещениях должна быть 0,5 лк, вне помещения – 0,2 лк.

*Охранное освещение* предусматривается вдоль границ охраняемых территорий и должно обеспечивать освещенность 0,5 лк.

По расположению источников света искусственное освещение делится на общее, местное и комбинированное.

При *местном освещении* световой поток концентрируется непосредственно на рабочих местах. В этом случае освещенности рабочего места и окружающего пространства сильно различаются, создаются неблагоприятные условия труда, возрастает опасность травматизма. На предприятиях связи использование одного местного освещения разрешается только для периодических работ с переносными лампами.

При *общем освещении* светильники располагаются в верхней зоне, обеспечивая равномерную освещенность рабочего помещения.

При *комбинированном освещении* к общему освещению добавляется местное.

В качестве *источников света* при искусственном освещении используются лампы накаливания и газоразрядные лампы. Основными характеристиками источников света являются номинальное напряжение, потребляемая мощность, световой поток, удельная световая отдача и срок службы.

## 8. 4. Расчет освещенности ЛАЦ

Согласно проекту оборудование СЦИ будет устанавливаться в линейно аппаратных залах городских АТС. Для расчета освещенности будем использовать типовое помещение со следующими параметрами:

- длиной  $A = 6$  м;
- шириной  $B = 6$  м;
- высотой потолка  $h = 5$  м;
- стены окрашены в светлые тона;
- потолок побелен;
- пол покрыт серым антистатическим линолеумом.

Освещение должно быть смешанным: естественное и искусственное.

### 8.4.1. Расчет естественной освещенности

Рассчитаем естественную освещенность в помещении оператора управления сети. Определим площадь световых проемов (остекления), размеры окон, их количество и размещение, учитывая отсутствие на противоположной стороне улицы домов.

Необходимая площадь окон для создания нормированной естественной освещенности определяется по формуле:

$$S_0 = \frac{S_n \cdot l_{\min} \cdot \eta_0 \cdot k}{100 \cdot \tau_0 \cdot \tau_1}, \quad (8.1)$$

где:

$S_n$  – площадь пола в помещении;

$$S_n = A \cdot B;$$

$$S_n = 6 \cdot 6 = 36 \text{ (м}^2\text{)}.$$

$l_{\min}$  – минимальный нормированный коэффициент естественной освещенности, зависящий от характера работы (для оператора видеотерминала  $l_{\min} = 1$ ).

$\eta_0$  - коэффициент световой характеристики окна. Предварительно необходимо определить параметры окна  $h_1$ .

Для этого зададимся высотой окна  $h_0 = 3,5$  (м), его размещением по отношению к уровню рабочей поверхности  $h_{РАБ}$ . Уровень рабочей поверхности равен  $h_{РАБ} = 0,85$  (м) согласно параметрам рабочего стола оператора. Под параметром  $h_1$  понимают возвышение верхнего края окна над горизонтальной рабочей поверхностью.

$$h_1 = h_0 + h' - h_{РАБ}. \quad (8.2)$$

Значение  $h' = 1$  (м), тогда

$$h_1 = h_0 + h' - h_{РАБ};$$

$$h_1 = 3,5 + 1 - 0,85 = 3,65 \text{ (м)}.$$

Необходимо определить еще два параметра: отношение лины помещения А к его ширине В и отношение верхнего края окна над горизонтальной рабочей поверхностью  $h_1$ .

$$\frac{A}{B} = \frac{6}{6} = 1; \quad \frac{B}{h_1} = \frac{6}{3,65} = 1,64.$$

Определим, что  $\eta_0 = 17$ .

$k$  - коэффициент учитывающий затенение окна противостоящими зданиями. Считаем, что противостоящие здания отсутствуют и принимаем  $k = 1$ ;

$\tau_0$  - коэффициент светопропускания. Для окон со стальными двойными переплетами в помещениях категории Б (помещение без больших выделений пыли) и вертикальным расположением остекления  $\tau_0 = 0,4$ ;

$\tau_1$  - коэффициент учитывающий влияние отраженного света при боковом освещении. Величина  $\tau_1$  - зависит от средневзвешенного коэффициента отражения света от ограждающих поверхностей помещения  $\rho_{cp}$ , который определяется по формуле:

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_n \cdot S_n + \rho_{cm} \cdot S_{cm} + \rho_{nm} \cdot S_{nm}}{S_n + S_{cm} + S_{nm}}, \quad (8.3)$$

где:

$\rho_n = 30$  - коэффициент отражения пола;

$\rho_{cm} = 50$  - коэффициент отражения стен;

$\rho_{nm} = 70$  - коэффициент отражения потолка;

$S_n = S_{nm} = A \cdot B$  - площадь пола и потолка

$$S_n = 6 \cdot 6 = 36 \text{ (м}^2\text{)};$$

$S_{cm} = 2 \cdot (A + B) \cdot h$  - площадь стен;

$$S_{cm} = 2 \cdot (6 + 6) \cdot 5 = 120 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким образом

$$\rho_{cp} = \frac{0,3 \cdot 36 + 0,5 \cdot 120 + 0,7 \cdot 36}{36 + 120 + 36} = 0,5.$$

При  $\rho_{cp} = 0,5$  и одностороннем освещении  $\tau_1 = 4$ .

Определив все параметры, входящие в формулу 8.1, находим

$$S_0 = \frac{36 \cdot 1 \cdot 17 \cdot 1}{100 \cdot 0,4 \cdot 4} = 3,8 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Площадь остекления должна быть не менее  $3,8 \text{ м}^2$ . Зная высоту окна  $h = 3,5$  (м) зададимся шириной окна  $b = 1,5$  (м), тогда площадь одного окна

$$S_{01} = h_0 \cdot b;$$

$$S_{01} = 3,5 \cdot 1,5 = 5,25 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Следовательно, необходимо одно окно.

#### **8.4.2 Расчет искусственного освещения**

Осветительные установки должны обеспечивать равномерную освещенность с помощью отраженного или рассеянного светораспределения: они не должны создавать слепящих бликов на клавиатуре и других частях пульта, а также на экране ВТ в направлении глаз оператора.

Нормирующий уровень освещенности для работы с ВТ принят при работе: только с экраном – 200 лк, с экраном и документацией – 400 лк, в основном с документацией – 1000 лк. (СНиП П-4-79 «Естественное и искусственное освещение»). Используемые источники света должны иметь коэффициент пульсации не более 10%.

Определим электрическую мощность осветительной установки  $W$ , количество светильников  $N$ , высоту подвеса светильников  $H_p$ , схему размещения светильников по потолку для создания общего равномерного освещения в помещении оператора.

Выбираем светильник типа АОД-Ш в котором применяются две лампы типа ЛБ-40, т. е. люминесцентные, белого света, мощность 40 Вт. Длина светильника 945 мм, расстояние от потолка до светильника равно 400 мм.

Минимальная освещенность для создания общего освещения, определяется по формуле:

$$E_{\min} = \frac{F_l \cdot N \cdot \eta \cdot Z \cdot n}{S \cdot k} \quad (8.4).$$

Откуда необходимое количество светильников равно:

$$N = \frac{E_{\min} \cdot S \cdot k}{F_l \cdot Z \cdot \eta \cdot n} \quad (8.5),$$

где:

$E_{\min}$  - минимальная, нормируемая общая освещенность в помещении оператора,  $E_{\min} = 400$  (лк) согласно (СНиП П-4-79 «Естественное и искусственное освещение»);

$S_n = A \cdot B$  - площадь пола в комнате оператора

$$S_n = 6 \cdot 6 = 36 \text{ (м}^2\text{)};$$

$k$  - коэффициент запаса, для помещения где отсутствуют выделения пыли  $k = 1,5$ ;

$F_l$  - световой поток, создаваемый одной лампой, лм, зависит от выбранной мощности и типа лампы. Для лампы типа ЛБ-40  $F_l = 2480$  (лм);

$Z$  - коэффициент неравномерности освещения, вводят для получения величины минимальной освещенности  $Z = 1,1 - 1,2$   $Z = 1,15$ ;

$\eta$  - коэффициент использования светового потока. Значение коэффициента  $\eta$  зависит от показателя помещения  $\varphi$  и коэффициентов отражения стен  $\rho_{ст}$  и потолка  $\rho_{пт}$ . А также от высоты подвеса светильников  $H_p$ . Высота подвеса светильников  $H_p$  определяется как

расстояние между уровнем горизонтальной рабочей поверхности  $h_{раб}$  и светильником. В нашем случае

$$H_p = h - (h_{раб} + h_{над}), \quad (8.6)$$

где:

$h$  – высота помещения, принятая 5 м;

$h_{раб} = 0,85$  (м) - уровень горизонтальной рабочей поверхности;

$h_{над} = 0,4$  (м) - расстояние от потолка до светильника.

Тогда

$$H_p = 5 - (0,85 - 0,4) = 3,75 \text{ (м)};$$

$$\varphi = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)};$$

$$\varphi = \frac{6 \cdot 6}{3,75 + (6 + 6)} = 0,8;$$

$\rho_{ст} = 50$  - коэффициент отражения стен;

$\rho_{пот} = 70$  - коэффициент отражения потолка;

$\eta_0 = 0,47$ ;

$n = 2$  - количество ламп в светильнике.

Количество светильников определим, подставив все числовые значения в формулу (8.5)

$$N = \frac{400 \cdot 36 \cdot 1,5}{2480 \cdot 1,15 \cdot 0,47 \cdot 2} = 8,06.$$

Таким образом, количество светильников равно 8 штук.

Разместим светильники по потолку двумя параллельными рядами по 4 светильника в каждом ряду.

Электрическая мощность установки будет равна

$$W = W_1 \cdot n \cdot N;$$

$$W = 40 \cdot 2 \cdot 8 = 640 \text{ (Вт)}.$$

Выводы: в разработанном разделе, посвященном вопросам безопасности и жизнедеятельности при работе в производственных помещениях, представлены требования к технике безопасности при наладке и монтаже оборудования,

нормы к освещению при работе обслуживающего персонала в ЛАЦ. Произведен расчет освещенности помещения при естественном и искусственном свете. Соблюдение представленных требований позволяет существенно повысить работоспособность обслуживающего персонала, а также избежать быструю уставаемость и травматизм на предприятиях связи.

## 9. ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА

### 9.1. Расчёт капитальных затрат на создание участка транспортной сети Москва – Чебоксары с использованием аппаратуры WDM

Общий состав капитальных затрат на проектирование участка транспортной сети между городами Москва-Чебоксары может быть рассчитан по следующей формуле

$$K = K_{\text{ЛАЦ}} \cdot N_{\text{ОП}} + K_{\text{ПВВ}} \cdot N_{\text{ПВВ}} + K_{\text{УП}} \cdot N_{\text{УП}} + K_{\text{ЛИН}} \cdot L + K_{\text{ГС}}, \quad (9.1)$$

где  $K_{\text{ЛАЦ}}, K_{\text{ПВВ}}, K_{\text{УП}}$  - капитальные затраты на одну станцию, один УП, один пункт ввода-вывода включая стоимость оборудования ЭПУ, стоимость его монтажа, настройки и прочие расходы;

$N_{\text{ОП}}, N_{\text{ПВВ}}, N_{\text{УП}}$  - количество ОП, ПВВ и УП на участке;

$K_{\text{ЛИН}}$  - капитальные затраты на 1 км линии связи с учетом стоимости кабеля и стоимости его прокладки;

$L$  – длина магистральной линии;

$K_{\text{ГС}}$  - капитальные затраты на гражданские сооружения проектируемого участка.

Капитальные затраты на один ОП, ПВВ и УП определяются исходя из объема устанавливаемого оборудования  $R_i$  в каждом из этих пунктов и стоимости единицы оборудования  $C_i$  с учетом стоимости монтажа, настройки и прочих расходов:

$$K_{\text{ЛАЦ}} = k \cdot \sum_{i=1}^n C_i R_i ; \quad (9.2)$$

$$K_{ПВВ} = k \cdot \sum_{j=1}^m C_j R_j ; \quad (9.3)$$

$$K_{УП} = k \cdot \sum_{i=1}^l C_i R_i , \quad (9.4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий стоимость монтажа, настройки и другие наценки к стоимости оборудования;

$n, m, l$  – количество видов оборудования.

Для доставки оборудования на пункты установки воспользуемся услугами грузоперевозки московского автокомбината № 2. Стоимость аренды одного фургона составляет 230 руб/час. Считаем, что для доставки груза на расстояния до 400 км автомобиль затратит не более 24 часов (во время аренды также входит время обратного пути до г. Москва). Таким образом, 7 автомобилей необходимо снять на 24 часа. Для доставки грузов на более отдаленные пункты необходимо арендовать транспорт на 48 часов (всего 6 автомобилей). Таким образом, общие затраты на транспортные расходы составляет:

$$З_{ТР} = (7 \cdot 24 + 6 \cdot 48) \cdot 230 = 77,3 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Для монтажа и настройки оборудования, используется временный штат сотрудников из 30 человек, сроком на 7 дней. Средний тариф оплаты работнику одного трудового дня – 800 руб. (с учетом налогов и транспортных расходов). Таким образом, общие затраты на монтаж и настройку оборудования составляют:

$$З_{МОН} = 7 \cdot 30 \cdot 800 = 168 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Смета затрат на стационарное оборудование приведена в таблицах 9.1. – 9.3. (Источник цен Интернет сайт производителей).

Таблица 9.1 - «Смета затрат на оборудование ОП» (используется полная загрузка системы)

Оборудование	Цена за 1 штуку (у.е.)	Количество	Общая стоимость (у.е.)

Система волнового уплотнения	780000	2	1560000
Усилитель EDFA	41000	1	41000
Терминальный мультиплексор STM-16	74000	16	1184000
Стойка с блоком распределения питания	6000	2	12000
Система управления	20000	2	40000
Кабели и разъёмы	400	40	16000
Прочее оборудование	3000	2	6000
Общая стоимость оборудования:			2859000

Таблица 9.2 - «Смета затрат на оборудование ПВВ»

Оборудование	Цена за 1 штуку (у.е.)	Количество	Общая стоимость (у.е.)
Оптический мультиплексор ввода-вывода	2000	4	8000
Усилитель EDFA	4100	2	8200
Терминальный мультиплексор STM-16	7400	4	29600
Стойка с блоком распределения питания	6000	2	12000
Кабели и разъёмы	400	8	3200
Прочее оборудование	3000	2	6000
Общая стоимость оборудования:			119900

Таблица 9.3 - «Смета затрат на оборудование УП»

Оборудование	Цена за 1 штуку (у.е.)	Количество	Общая стоимость (у.е.)
Усилитель EDFA	41000	14	574000
Стойка с блоком распределения питания	6000	7	42000
Кабели и разъёмы	400	14	5600
Общая стоимость оборудования:			621600

Капитальные затраты на 1 км линии определяются исходя из стоимости 1 км кабеля,  $K_{\text{км.каб}} = 1700$  у.е. (с учётом НДС), стоимости его прокладки и монтажа в размере 2000 у.е. на один километр магистрали.

$$K'_{\text{лин}} = 1700 + 4000 = 3700 \text{ (у.е.)}$$

Капитальные затраты на 1 км линии составляют  $K'_{\text{лин}} = 3700$  (у.е.)

Капитальные затраты на строительство кабельных сооружений протяженностью

$L = 674$  (км) составляют:

$$K_{\text{лин}} = K'_{\text{лин}} \cdot L \text{ (9.5);}$$

$$K_{\text{лин}} = 3700 \cdot 674 = 2493800 \text{ (у.е.)}$$

Капитальные затраты на гражданские сооружения проектом не предусмотрены.

Таким образом, общая величина капитальных затрат на организацию магистральной линии составляет:

$$K' = 2859000 + 1199200 + 621600 + 2493800 = 7173600 \text{ (у.е.)}$$

Величина капитальных затрат, представленная в рублях составляет (1у.е.=28 руб.):

$$K' = 7173600 \cdot 28 = 200861 \text{ (тыс. руб.)}$$

С учетом транспортных расходов, и расходов на монтаж оборудования имеем:

$$K = 200861 + 77,3 + 168 = 201106 \text{ (тыс. руб.)}$$

## 9.2 Расчет эксплуатационных расходов

Расчет годовых эксплуатационных расходов производится по следующим статьям затрат:

- расходы на оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- расходы, связанные с арендой помещений;
- прочие расходы, включающие: затраты по ремонту основных

производственных

фондов; платежи по обязательному страхованию имущества; прочие административно-хозяйственные расходы.

### 9.2.1 Расходы на оплату труда

Для расчёта фонда заработной платы требуется рассчитать численность штата. Технические возможности позволяют обслуживать и контролировать оборудование централизованно, т.е. постоянный обслуживающий персонал должен находиться только в четырех пунктах.

Количество работников для обслуживания и круглосуточного контроля технологического оборудования в ОП составляет 9 человек, из которых 1 ведущий инженер и 8 инженеров, работающих посменно. Для обслуживания ПВВ необходим штат сотрудников из 5 человек, из которых 1 ведущий инженер и 4 инженера, работающих посменно.

Обслуживание оборудования в остальных сетевых узлах целесообразно возложить на сотрудников службы эксплуатации с соответствующей доплатой и проведением обучения, из расчёта 2 техника на сетевой узел.

Численность работников кабельного участка:

$$M_{KV} = \frac{N_i \cdot H_i}{\Phi_{MЕС}} \cdot K_{ОТП}, \quad (9.6)$$

где  $N_i = 674$  (км) - протяжённость линии;

$H_i = 4,9$  - норматив обслуживания в человеко-часах;

$K_{ОТП} = 1,08$  - коэффициент, учитывающий резерв на отпуск;

$\Phi_{MЕС} = 169$  - месячный фонд рабочего времени.

Следовательно:

$$M_{KV} = \frac{674 \cdot 4,9}{169} \cdot 1,08 = 21,2 \approx 22 \text{ (чел.)}$$

В таблице 9.4 представлены наименования должностей работников, их количество и месячная зарплата.

Таблица 9.4 - Штат работников для обслуживания системы передачи

№	Наименование должности	Месячная зарплата (тыс. руб.)	Количество работников
1	Ведущий инженер	12	4
2	Инженер	9	24
3	Кабельщик	6	22
4	Техник	6	22
5	Служба эксплуатации существующих объектов	1	22

Фонд оплаты труда рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_{ОТ} = \Phi_{ЗПМЕС} \cdot 12 + \Phi_{ДОП} + \Phi_{ПРЕМ}. \quad (9.7)$$

Заработная плата за месяц определяется по должностным окладам в зависимости от квалификации работников:

$$\Phi_{ЗП} = \sum_{i=1}^k Z_{MЕС.i} \cdot M_i, \quad (9.8)$$

где  $Z_{MEC.i}$  – месячная заработная плата работника  $i$ -ой профессии, руб.;

$M_i$  - число работников.

Таким образом, заработная плата в соответствии со штатным расписанием составляет:

$$\Phi_{3II} = 12 \cdot 4 + 9 \cdot 24 + 6 \cdot 22 + 6 \cdot 22 + 1 \cdot 22 = 550 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Дополнительные выплаты за работу в праздничные дни и в ночное время составляют 1,2% от основной заработной платы, а премиальный фонд – 25% от основной заработной платы.

Тогда:

$$\Phi_{OT} = (1 + 0,012 + 0,25) \cdot \Phi_{3II} \cdot 12; \quad (9.9)$$

$$\Phi_{OT} = (1 + 0,012 + 0,25) \cdot 550 \cdot 12 = 8329,2 \text{ (тыс. руб.)}.$$

### 9.2.2 Отчисления на социальные нужды

В соответствии с федеральным законом от 20 ноября 1999 г. № 197 – ФЗ ставка единого социального налога составляет 35,6% от ФОТ, и складываются из:

- 4% - социальное страхование;
- 28% - пенсионный фонд;
- 0,2% - федеральный фонд медицинского страхования;
- 3.4% - территориальный фонд медицинского страхования.

Данные по расходам на эти статьи приведены в таблице 9.5

### 9.2.3 Расходы на электроэнергию

Расходы на оплату электроэнергии рассчитываются, исходя из мощности, потребляемой оборудованием, кВт·ч, и тарифа на электроэнергию, отпускаемую энергосистемами. Учитывая, что мощность, потребляемая синхронным мультиплексором составляет 300 Вт, мощность потребляемая усилителем EDFA 30 Вт, аппаратурой волнового уплотнения 800 Вт, а также в связи с необходимостью в ОП и ПВВ в ночное время (8 часов в сутки) использовать

искусственное освещение с потребляемой мощностью 640 Вт (расчет мощности осветительной установки приведен в гл. 8).

Расходы на оплату электроэнергии рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E}_{эл} = \frac{m_T \cdot 8760 \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot p_i}{1000 \cdot \eta}, \quad (9.10)$$

где  $m_T = 1,2$  - тарифная плата за 1 кВт·ч;

$n_i$  - количество единиц аппаратуры данного типа;

$p_i$  - мощность, потребляемая единицей аппаратуры;

$\eta = 0,8$  - КПД.

$$\mathcal{E}_{эл} = \frac{1,2 \cdot 8760 \cdot (20 \cdot 300 + 17 \cdot 30 + 2 \cdot 800 + 4 \cdot 640 \cdot 8 / 24)}{1000 \cdot 0,8} = 117,77 \text{ (тыс. руб.)}.$$

#### 9.2.4. Амортизационные отчисления

Амортизационные отчисления определяются исходя из величины капитальных затрат на соответствующее оборудование и сооружения  $K_i$  и норм амортизационных отчислений  $H_{ai}$ :

$$A = \frac{\sum H_{ai} \cdot K_i}{100}. \quad (9.11)$$

Нормы амортизационных отчислений:

- для стационарного оборудования – 6%;
- для линейных сооружений – 3,9%;

$$A = \frac{6 \cdot 5376632 + 3,9 \cdot 3700 \cdot 674}{100} \cdot 28 = 11756 \text{ (тыс. руб.)}.$$

#### 9.2.5 Расходы, связанные с арендой помещений

Для построения транспортной сети необходимо в городах: Москва, Владимир, Нижний Новгород и Чебоксары разместить обслуживаемые пункты каждый площадью 30 ( $m^2$ ). Стоимость аренды одного квадратного метра

площади составляет 300 у.е. в год. В остальных, менее населенных пунктах, стоимость арендной платы составляет 30 у.е. в год за один квадратный метр. Площадь каждого обслуживаемого пункта составляет 10 ( $m^2$ ).

Общее количество оконечных пунктов и пунктов ввода вывода составляет четыре. Количество усилительных пунктов для первого способа построения сети – семь, для второго варианта – четыре.

Таким образом, эксплуатационные расходы, связанные с арендой помещений составляют:

$$AP = (4 \cdot 30 \cdot 300 + 7 \cdot 10 \cdot 30) \cdot 28 = 1067 \text{ (тыс. руб.)}.$$

### 9.2.6 Прочие расходы

Платежи по обязательному страхованию имущества определяются в размере 0,8% от стоимости оборудования. Ремонтный фонд составляет 2% от общей стоимости оборудования. Транспортные расходы, производственные, административно-управленческие и эксплуатационно-хозяйственные расходы, определяются в размере 58,9% от ФОТ.

Результаты расчетов всех статей затрат заносим в таблицу 9.5.

Таблица 9.5 - «Эксплуатационные затраты»

№ п/п	Наименование статей	Сумма затрат, тыс. руб.
1.	Фонд оплаты труда	8329,2
2	Отчисления на социальные нужды:	2965,2
	- соц. страхование	333,2
	- пенсионный фонд	2332,2
	- мед. страхование (фед. фонд)	16,6
	- мед. страхование (тер. фонд)	283,2
3	Расходы на оплату электроэнергии	117,8
4	Амортизационные отчисления	11756

5	Расходы, связанные с арендой помещений	1067
6	Прочие расходы:	11045,9
	- обязательное страхование имущества	1754,3
	- ремонтный фонд	4385,7
	- административно-управленческие расходы	4905,9
Всего:		35281,1

### 9.3 Расчёт годового экономического эффекта

Срок окупаемости капитальных вложений  $T_K$  показывает за какой период времени в годах эффект, полученный в результате капитальных затрат, может возместить сумму этих вложений.

$$T_K = \frac{K}{П}. \quad (9.13)$$

Рассчитаем предполагаемый доход от проектируемой магистрали:

$$Д = N_{КАН} \cdot T, \quad (9.14)$$

где  $N_{КАН}$  – количество организуемых каналов;

$T$  – стоимость аренды одного канала в год.

Согласно тарифам ОАО "Ростелеком" стоимость аренды канала  $E_1$  (2048 кбит/с) составляет 400 у.е. в год для канала протяженностью до 500 км и 600 у.е. для канала свыше 500 км. В данном проекте организована транспортная сеть, позволяющая организовать 6 потоков STM-16 (6048 потоков  $E_1$ ) между городами Москва – Чебоксары (расстояние между которыми более 500 км), по 2 потока STM-16 (2016 потоков  $E_1$ ) между городами: Москва – Владимир и Нижний Новгород – Чебоксары, и 1 поток STM-16 (1008 потоков  $E_1$ ) между городами: Владимир - Нижний Новгород (расстояние между которыми менее 500 км).

При условии, что все сданные в эксплуатацию каналы будут арендованы, предполагаемый доход будет составлять:

$$D = (6048 \cdot 400 + 5040 \cdot 600) \cdot 28 = 152410 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Рассчитаем срок окупаемости проекта:

$$T = \frac{K}{D - \text{Э}}, \quad (9.15)$$

где,  $K$  – объем капитальных вложений;

$D$  – годовой доход;

$\text{Э}$  – эксплуатационные расходы.

$$T = \frac{201106000}{152410000 - 35281100} = 1,7 \text{ (года)}.$$

Следовательно, срок окупаемости проекта составит один год и восемь месяцев.

## Список литературы

1. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов . Под ред. Профессора ; под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком.2011. – 368 с.
2. Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н. и др. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. - Горячая линия-Телеком , 2008. -392 с
3. О.К. Скляр В. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие. – СПб.: Изд. «Лань», 2010. – 272 с.
4. Э.Л. Портнов. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов. – М.: Изд. «Горячая линия - Телеком», 2009. - 544 с.
5. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов/ В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко и др. Ред. В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия, 2004. – 510 с.
6. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/ В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др. Ред. В.И. Иванова. – М.: Горячая линия, 2005. - 232 с.
7. Р. Фриман. Волоконно-оптические системы связи. 3-е дополненное издание. – М.: Техносфера, 2006. – 496 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

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

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники**

Утверждаю:

Зав. кафедрой СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ Шарангович С.Н.

\_\_\_ сентября 2012 года

### **ЗАДАНИЕ**

на курсовой проект по дисциплине

**“Оптические цифровые телекоммуникационные системы”**

Студенту РТФ группы 153 -Миргороду Вячеславу Геннадьевичу

- 1. Тема проекта:** Скоростная волоконно-оптическая магистраль Чита – Улан-Удэ.
- 2. Срок сдачи работы:** « 25 » \_ноября\_ 2012 г.
- 3. Цель проекта:** провести проектирование волоконно-оптической магистрали
- 4. Исходные данные для проектирования:**
  - 4.1. Число цифровых телефонных каналов связи – 5000;
  - 4.2. Система должна содержать не менее 1000 каналов компьютерной связи – 10 Мбит/с каждый;
  - 4.3. В системе должно быть предусмотрена возможность организации в стандарте MPEG-2 не менее 80 каналов цифрового телевидения;
  - 4.4. Вероятность ошибки для телефонных каналов не должна превышать  $10^{-9}$ ;
  - 4.5. Вероятность ошибки каналов компьютерной связи – не более  $10^{-11}$ ;
  - 4.6. Условие эксплуатации – станция должна быть работоспособной в диапазоне температур  $+5 \div 50$  °С.
- 5. Вопросы, подлежащие разработке:**
  - 5.1. Аналитический обзор волоконно-оптических сетей связи;

- 5.2. Выбор и обоснование структурной схемы оптоволоконной системы передачи;
- 5.3. Выбор и обоснование основных конструктивных элементов ВОСП;
- 5.4. Расчет ВОЛС;
- 5.5. Расчет помехоустойчивости ВОСП;
- 5.6. Рассмотрение вопросов эксплуатации и надежности;
- 5.7. Технико-экономическое обоснование проекта.

**6. Содержание пояснительной записки:**

- 6.1. Титульный лист
- 6.2. Реферат
- 6.3. Лист задания с подписью преподавателя
- 6.4. Содержание
- 6.5. Введение. Постановка задачи
- 6.6. Обзор литературы по заданной тематике
- 6.7. Основная часть
- 6.8. Интерпретация результатов и выводы по проделанной работе.
- 6.9. Список использованной литературы

**7. Перечень графического материала:**

- 7.1. Структурная схема магистральной ВОСП.
- 7.2. Диаграмма уровней сигналов

**8. Рекомендуемая литература:**

- 8.1. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов . Под ред. Профессора ; под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком.2011. – 368 с.
- 8.2. В.Н. Гордиенко, М.С. Тверецкий Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия, 2005. - 416 с.
- 8.3. .Н.Слепов Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000, 468с.

**9. Дата выдачи задания: « 1 » сентября 2012 г.**

Руководитель проекта: \_\_\_\_\_ проф. Коханенко А.П  
01.09.2012

Задание принял к исполнению: \_\_\_\_\_ Миргород В. Г.

01.09.2012

**Учебное издание**

**Коханенко Андрей Павлович**  
**Шарангович Сергей Николаевич**

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию  
по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» для  
студентов специальности 210401 – Физика и техника оптической связи

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 7,21  
Тираж 30 экз. Заказ 1669  
Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.