

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А.С. Перин, С.Н. Шарангович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2019

УДК 621.391.1.519.8(075.8)  
ББК 32.88-01я73  
П274

Рецензенты:

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, профессор;  
**Тихомиров А.А.**, д-р техн. наук, профессор

**Перин, Антон Сергеевич**

П274 Проектирование оптических цифровых телекоммуникационных систем: учеб. пособие / А.С. Перин, С.Н. Шарангович. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2019. – 114 с.

ISBN 978-5-86889-838-9

Приведены основные теоретические материалы по проектированию цифровых волоконно-оптических систем передачи. Рассмотрены общие принципы построения и выбора компонентов многоволновых оптических сетей связи, дан расчет длин регенерационных и усилительных участков, показателей надежности, рассмотрены схемы организации связи, изложены вопросы тестирования компонентов и оценки их характеристик. Представлены методические рекомендации и примеры решения задач проектирования.

Для студентов всех форм обучения по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Оптические системы и сети связи».

УДК 621.391.1.519.8(075.8)  
ББК 32.88-01я73

ISBN 978-5-86889-838-9

© Перин А.С., Шарангович С.Н., 2019  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2019

## Оглавление

Введение .....	5
1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ .....	6
2 ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ .....	12
2.1 Требование к компонентам оптических систем .....	12
2.2 Мультиплексоры и демультимплексоры .....	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
3 РАСЧЕТ ДЛИНЫ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО И УСИЛИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ .....	32
3.1 Определение необходимого качества передачи системы связи .....	32
3.2 Определение максимальной длины усилительного участка .....	34
3.3 Определение максимальной длины регенерационного участка .....	37
4 СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ .....	41
4.1 Составление схемы организации связи .....	41
4.2 Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ и типа оптического кабеля .....	42
4.3 Определение оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендаций МСЭ-Т .....	57
4.4 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети .....	61
4.5 Проектирование участка транспортной сети Москва – Чебоксары .....	65
4.5.1 Проектирование прямого направления (Москва – Чебоксары) .....	65
4.5.2 Проектирование обратного направления (Чебоксары – Москва) .....	74
4.6 Определение помехозащищенности спроектированного участка транспортной сети .....	80
5 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ .....	83
5.1 Общие положения .....	83

5.2 Основные показатели надежности.....	85
5.3 Требования к показателям надежности ВОЛС .....	86
5.4 Оценка надежности участка первичной магистральной сети .....	88
5.4.1 Оценка надежности работы линейно-кабельных сооружений.....	88
5.4.2 Оценка надежности работы аппаратуры.....	90
5.4.3 Оценка работы надежности участка сети с учетом линейных сооружений и аппаратуры.....	93
<b>6 ТЕСТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК .....</b>	<b>95</b>
6.1 Общие положения.....	95
6.2 Оптические источники и приемники для тестирования .....	96
6.3 Измерители мощности излучения.....	98
6.4 Анализаторы оптического спектра .....	99
6.5 Измерители длины волны .....	101
6.6 Тестирование мультиплекторов и демупльтиплекторов.....	102
6.7 Тестирование оптических источников и приемников .....	106
Литература.....	108
Список сокращений .....	110
Приложение А Пример технического задания на курсовое проектирование.....	111

## Введение

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

Данное учебное 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 заданий курсового проекта.

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

Список литературы включает источники, рекомендуемые для самостоятельного и более углубленного изучения вопросов, выносимых на практические занятия [1–7], 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 Московского технического университета связи и информатики Шарафутдиновым Р.М., а также методики составления схем организации связи [1].

# 1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

---

В настоящее время волоконно-оптические коммуникации используются в сетях практически всех масштабов: корпоративных сетях, сетях доступа, городских, региональных сетях, междугородних линиях связи, трансконтинентальных линиях связи. И чем больше протяженность и выше скорость передачи, тем более заметны преимущества технологии волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) по сравнению с другими. Рост скорости передачи в протяженных линиях связи показывает, что альтернативы волокну нет. Мы наблюдаем соревнование существующей волоконно-оптической технологии с новой, более совершенной волоконно-оптической технологией. При строительстве протяженных ВОЛС волокно осталось один на один с самим собой.

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

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

С появлением одномодового волокна (которое сегодня известно как стандартное одномодовое волокно, SSF или волокно G.652) стало 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 было сложно реализовать на практике преимущество но-

вого 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.

Минимальные значения потерь в стандартном одномодовом волокне 0,2–0,25 дБ/км достигаются 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 появления 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.

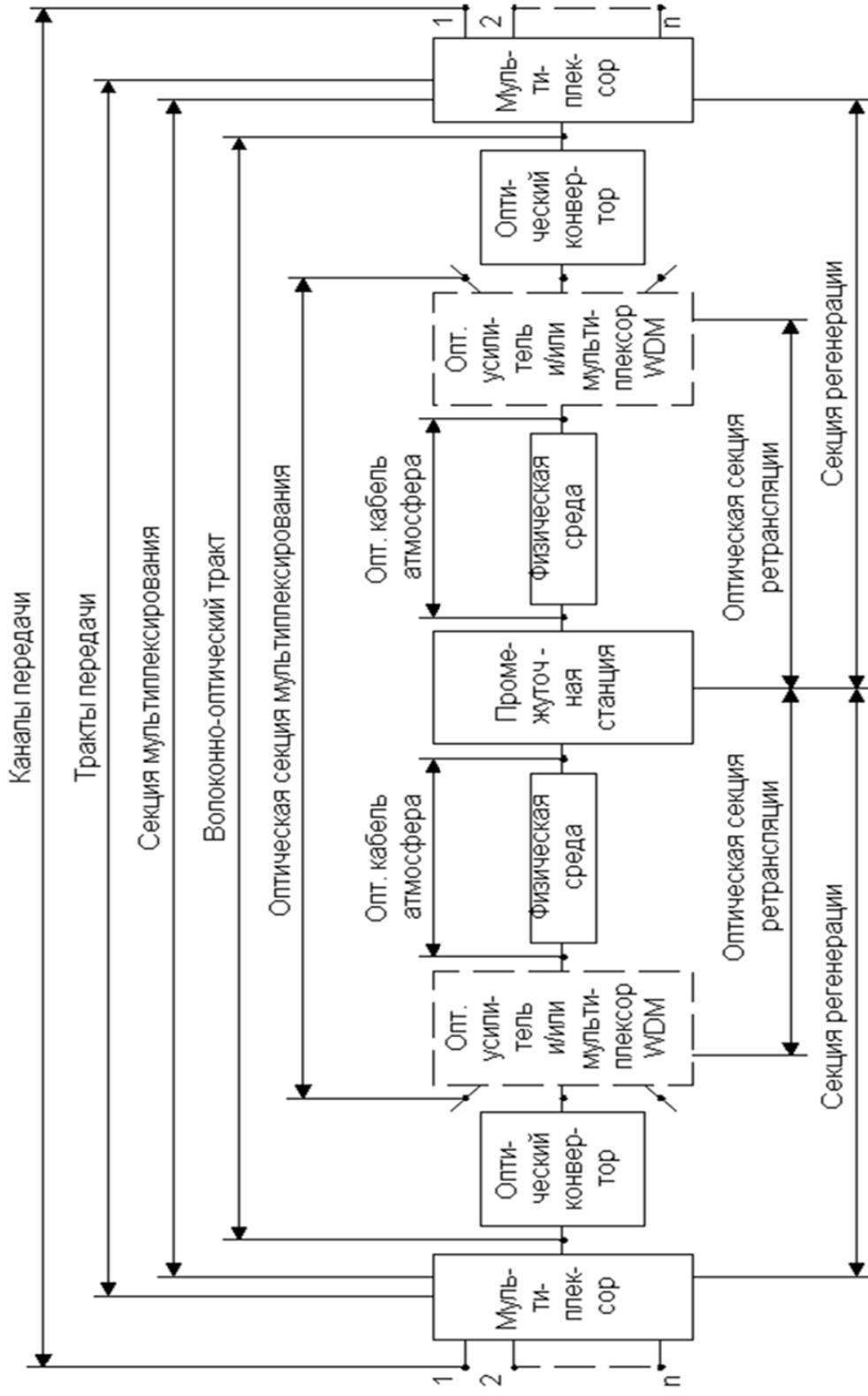


Рисунок 1.1 – Обобщенная схема оптической системы передач

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 широкая полоса пропускания. Сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения потенциально также являются 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, 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). Спецификация 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 характерны свои особенности.

- 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 современной технологии WDM, как и любой новой технологии, одновременно со значительными преимуществами принесло и новые проблемы. Основной проблемой для операторов систем WDM является обеспечение их надежной и стабильной работы. 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), их применение экономически оправдано, и, по мнению многих специалистов, именно по этому направлению будет увеличиваться пропускная способность сетей связи.

## 2 ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

---

### 2.1 Требование к компонентам оптических систем

Основное требование к компонентам современных оптических сетей связи состоит в том, что они должны одинаково обрабатывать все каналы на всем протяжении оптического пути линии связи. Для этого требуется тщательный выбор оптических передатчиков, мультиплексоров, демультиплексоров, усилителей и волокна. Все оптические характеристики пассивных и активных компонентов сети – вносимые потери, потери на отражение, дисперсия, поляризационные эффекты и т.д., должны измеряться как функции длины волны во всем диапазоне длин волн, используемом для передачи в системе связи. В системах WDM часто используют значительно более сложные устройства, чем в системах с одной рабочей длиной волны, и проводить тестирование характеристик таких устройств намного сложнее. В мультиплексорах, демультиплексорах, узкополосных фильтрах систем DWDM используются тонкопленочные фильтры, сварные биконические разветвители BFT (Fused Biconic Tapered 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 компо-

нента, но и всей системы. 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 получается 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 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).

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, незначительно изменяя процесс производства, можно создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

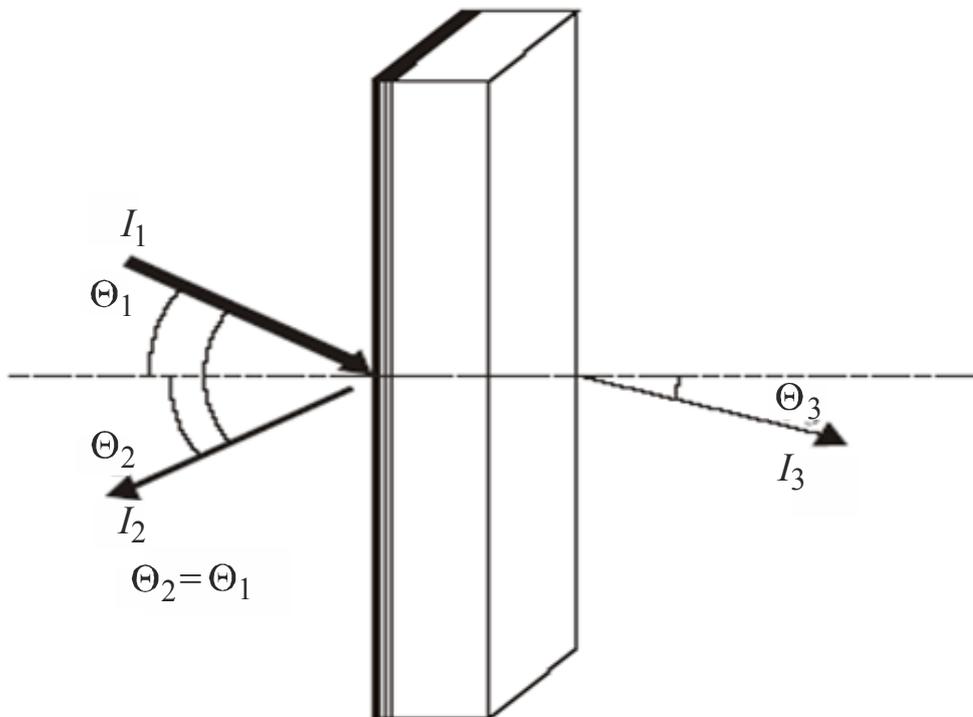


Рисунок 2.1 – Тонкопленочный фильтр

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 или 32 кана-

лами [6]. В современных системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

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

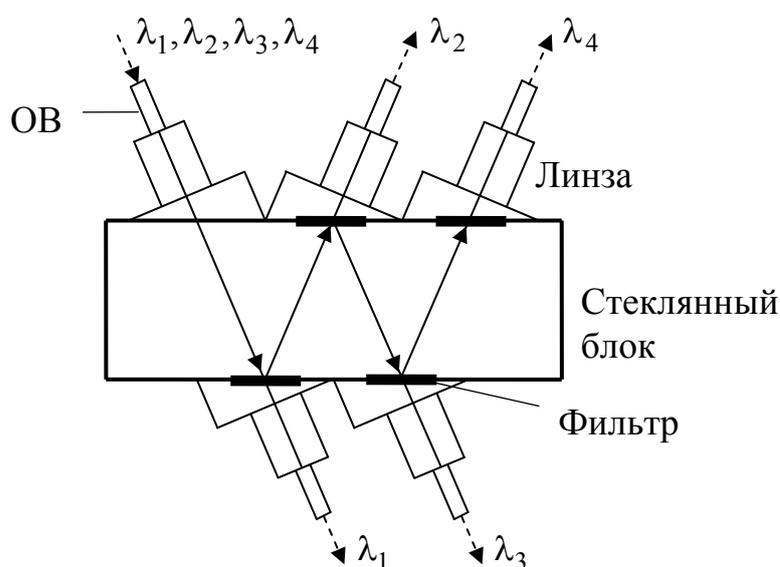


Рисунок 2.2 – Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демultipлексирования составного сигнала

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

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

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

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

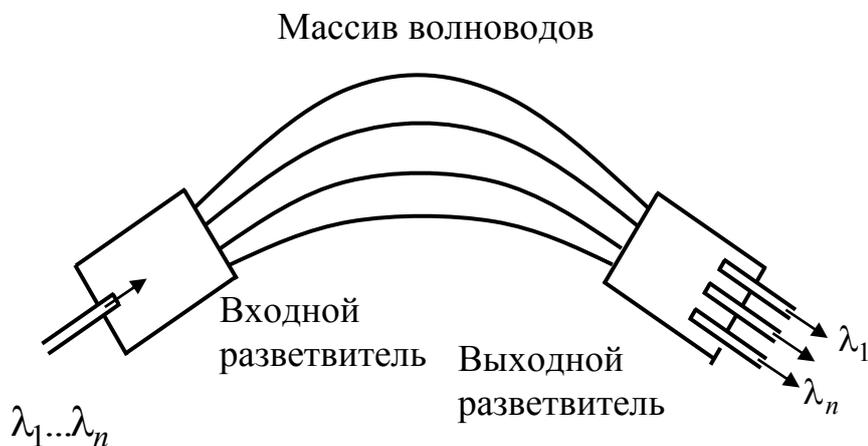


Рисунок 2.3 – Решетка на основе массива волноводов AWG

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

## 2.3 Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов

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

зую 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 подразделе 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 (рисунки 2.5, 2.6). 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 длины волны оптического сигнала (в пределах указанных выше ограничений).

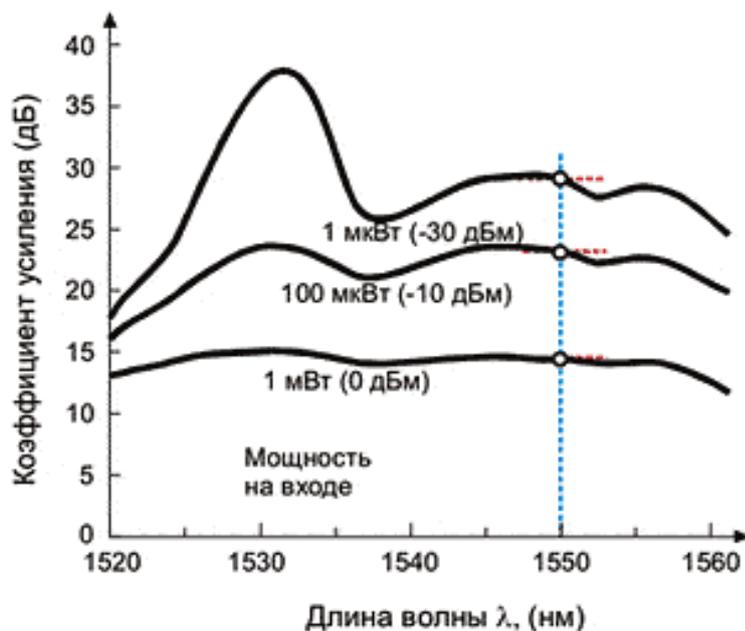


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности

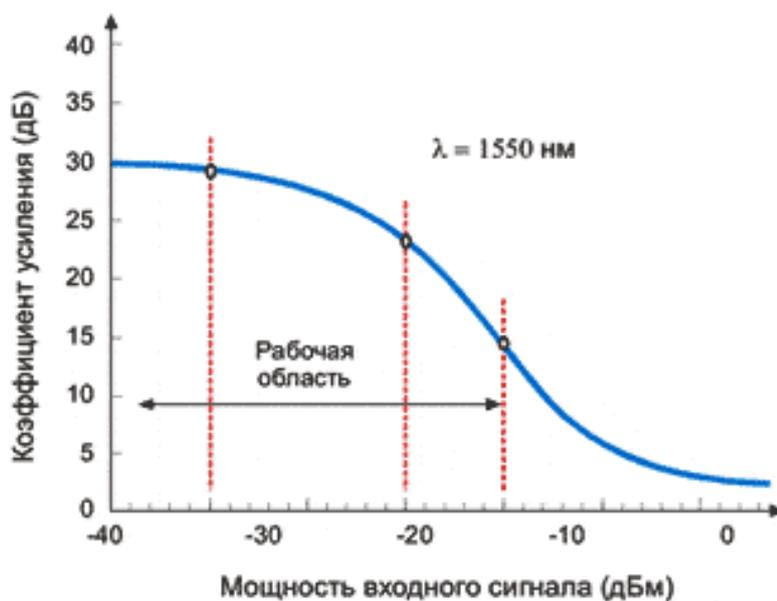


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм

Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию, например коммутаторам ATM или компонентам протокола IP, не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость одно из основных преимуществ использования их в системах WDM. Наряду с этим при использовании усилителей EDFA требуется обязательно 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 необходимости. Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети. Каждая линия связи уровня STM-16 обрабатывается в системе WDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем WDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем WDM в эксплуатацию достаточно низка [7].

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки (рисунк 2.7). 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 рисунке 2.7, состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного эрбием ( $\text{Er}^{3+}$ ), 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, усилитель типа EDFA может использовать длины волн накачки в диапазоне 600–700 нм. Для накачки предпочтительно использовать GaAs лазерные диоды, у которых достигается эффективность накачки порядка 11 дБ/мВт.

Существует несколько различных конфигураций EDFA. На рисунке 2.7 показаны три различные конфигурации, используемые для накачки. Рисунок 2.7,а иллюстрирует использование одного источника накачки в прямом направлении, когда потоки накачки и сигнала распространяются в одном и том же направлении (сонаправленная накачка). Рисунок 2.7,б показывает использование одного источника накачки в обратном направлении (противонаправленная накачка).

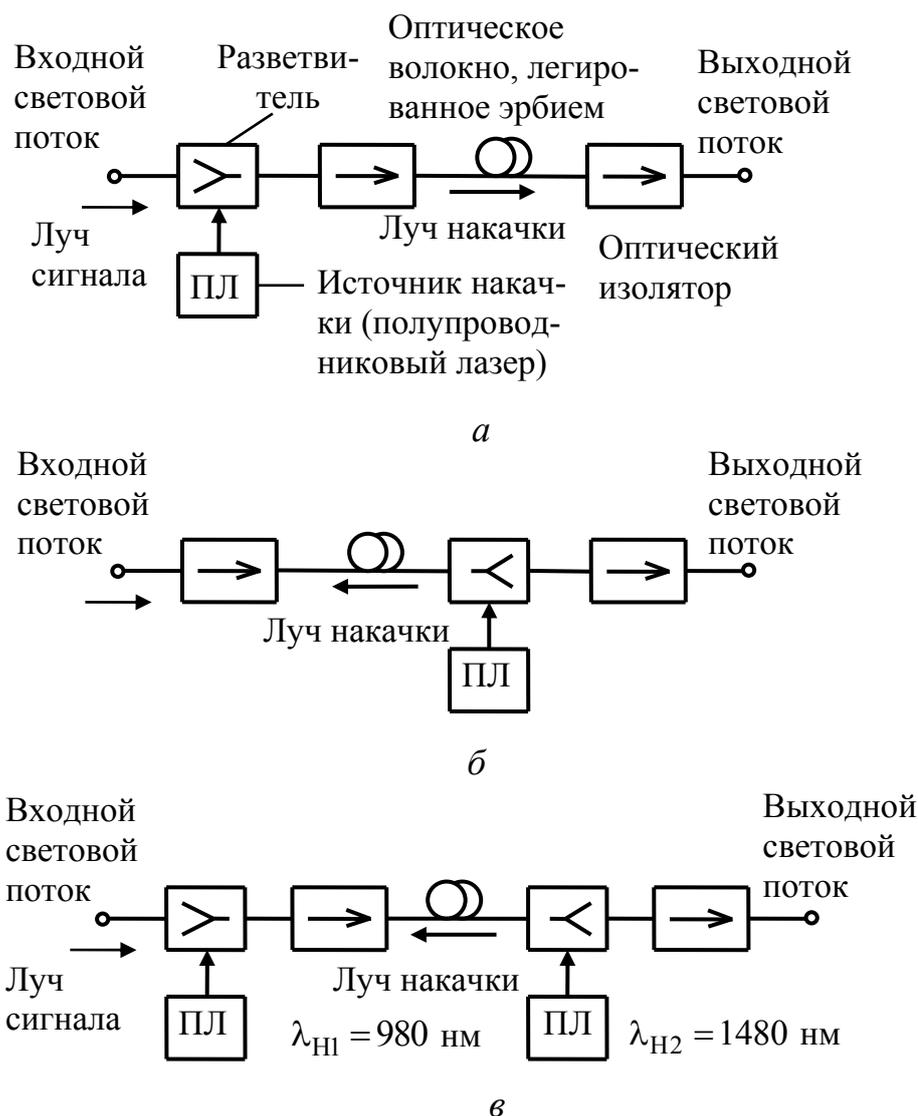


Рисунок 2.7 – Схемы использования усилителей типа EDFA:  
*а* – сонаправленная накачка; *б* – противонаправленная накачка;  
*в* – двунаправленная накачка

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 излучение (ASE). Если важно иметь низкий уровень шума, то лучше использовать сонаправленную накачку.

Существует также двунаправленная накачка (рисунок 2.7,в), когда усилитель накачивается в обоих направлениях одновременно. Обычно для противонаправленной накачки используется длина волны 1480 нм, а для сонаправленной – 980 нм. Это дает возможность использовать сильные стороны каждой из них. Накачка на длине волны 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 усилитель 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) позволяют 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 возникает значительная перекрестная модуляция между усиливаемыми каналами, что ограничивает их применение 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 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, характерна 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

$$G = \frac{P_{с\text{ Вых}}}{P_{с\text{ Вх}}}, \quad (2.1)$$

где  $P_{с\text{ Вх}}$  и  $P_{с\text{ Вых}}$  – мощности (полезных) сигналов на входе и выходе усилителя.

Логарифмический эквивалент коэффициента усиления (дБ)

$$g = 10 \lg G. \quad (2.2)$$

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 приведены типовые зависимости от длины волны для трех фиксированных значений мощности. Более простой вид (монотонно убывающей функции) имеет зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала. Такая зависимость для длины волны 1550 нм приведена на рисунке 2.6.

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

При входных сигналах с высоким уровнем мощности (для усилителя EDFA обычно более 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, называемой 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:

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

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, насколько возрастает шум в усилителе по сравнению с полезным сигналом, и определяется делением отношения сигнал-шум на входе ( $\text{OSNR}_{\text{вх}}$ ) на отношение сигнал-шум на выходе ( $\text{OSNR}_{\text{вых}}$ ):

$$\text{NF} = \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{ш вх}}} / \frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{ш вых}}} = \frac{\text{OSNR}_{\text{вх}}}{\text{OSNR}_{\text{вых}}}. \quad (2.4)$$

#### **Методика определения коэффициента усиления в зависимости от мощности входного сигнала**

Для примера будем считать, что проектируется участок транспортной сети с применением аппаратуры волнового уплотнения Lambda Driver 1600 с диапазоном длин волн от 1536,6 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 2.8.

Используя паспортные значения коэффициента усиления при мощности входного сигнала, построим зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны (рисунок 2.9).

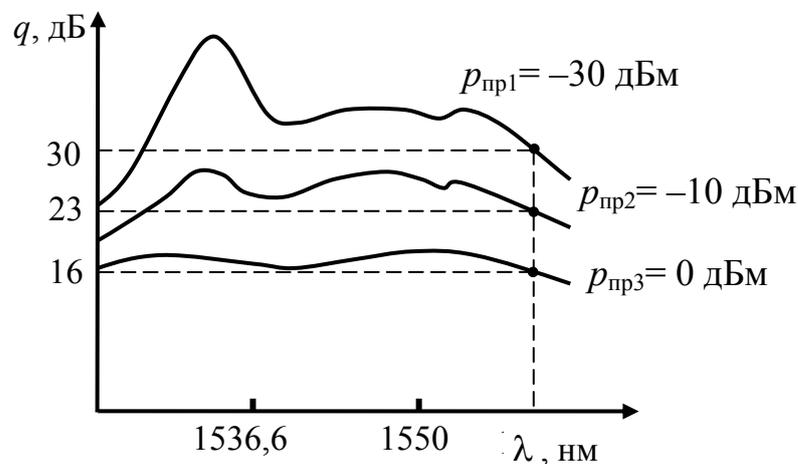


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала при фиксированных значениях мощности для усилителя Lucent 1713

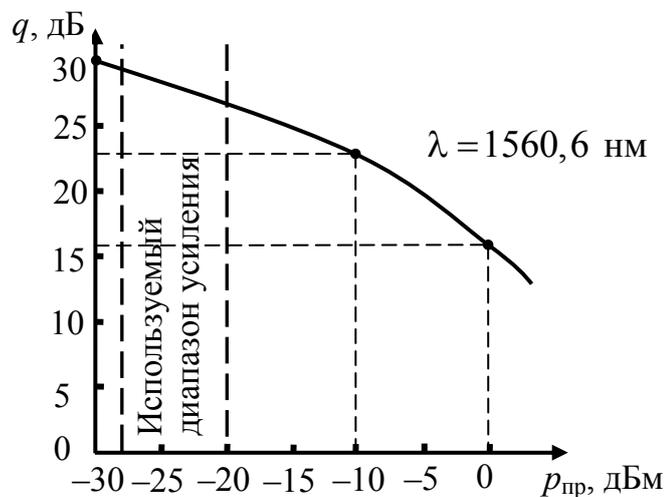


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны для усилителя Lucent 1713

Таким образом, изменение коэффициента усиления в рабочем диапазоне составляет порядка 2 дБ. Для определения коэффициента усиления в зависимости 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:

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

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

Таким образом, искомая аппроксимирующая функция имеет вид

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

В дальнейшем при определении коэффициента усиления в зависимости от мощности входного сигнала для усилителя Lucent 1713 будем 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 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 мощно-

стью 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 (рисунок 2.10). 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].

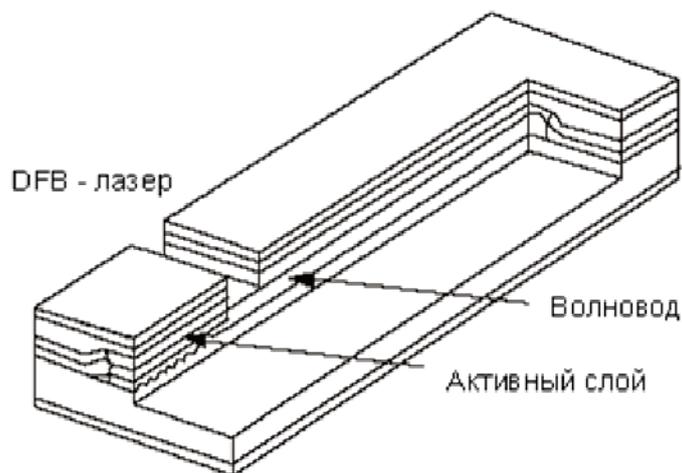


Рисунок 2.10 – Упрощенный вид кристалла DFB-лазера

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 в активную область усиления лазера. Если в линии создаются параллельные частично отражающие поверхности в пределах длины когерентности лазера, то возникает отраженный сигнал, когерентный 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 по 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 имеются различные схемы выявления и исправления ошибок.

Обычно в качестве фотоприемников используются два типа фотодиодов [2]: PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды APD (Avalanche Photodiode). PIN-фотодиоды работают со стандартными низковольтными источниками питания (5 В), но они менее чувствительны и имеют более узкую область спектральной чувствительности по сравнению с лавинными фотодиодами. До появления лавинных фотодиодов высокоскоростные PIN-фото-

диоды 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 – 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 (рисунок 2.11). 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 разработали волокно со смещенной дисперсией (G.653 по классификации ITU), которое имеет нулевую дисперсию на длине волны около 1550 нм (см. рисунок 2.11). На этой длине волны затухание ниже, чем на 1310 нм, поэтому 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.

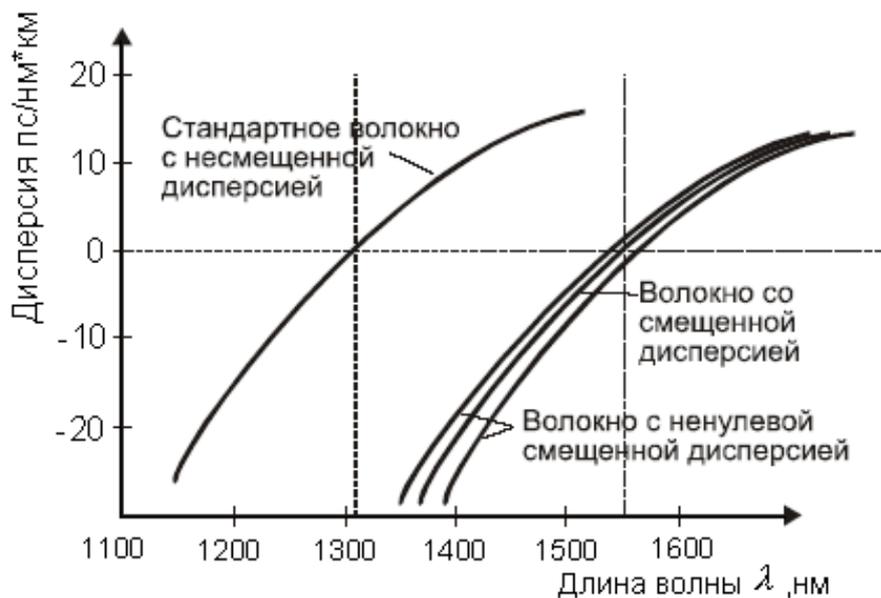


Рисунок 2.11 – Типичные значения дисперсии для различных типов оптических волокон

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 невозможно использовать любые длины волн из частотного плана ITU.

### 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 2.12) – волокна с ненулевой смещенной дисперсией (G.655 по классификации ITU).

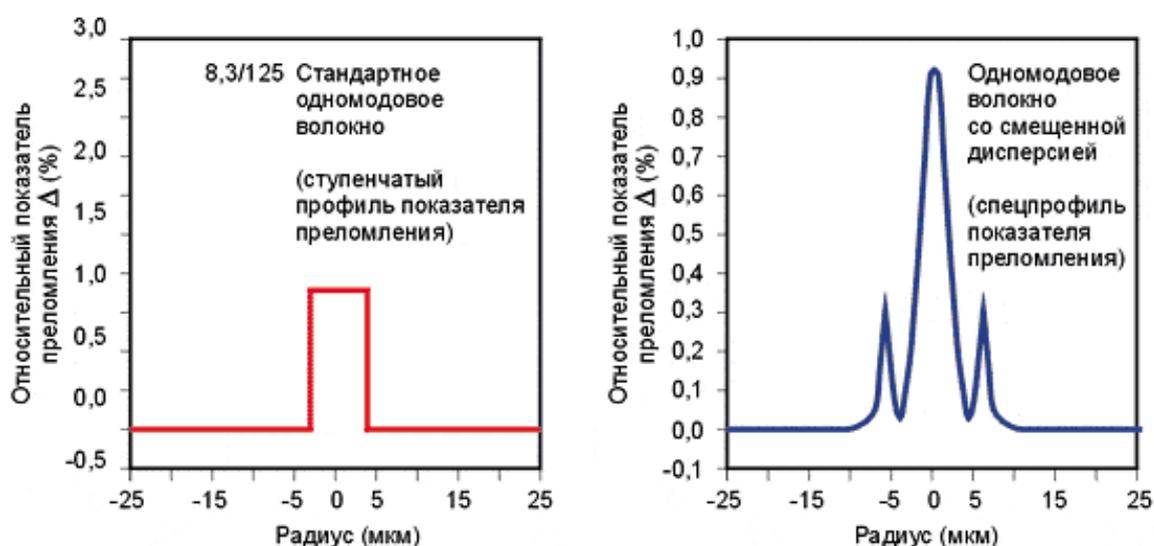


Рисунок 2.12 – Типичные профили коэффициента преломления для одномодовых оптических волокон

В пределах рабочего диапазона EDFA волокно G.655 имеет небольшую, хорошо контролируемую 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 допустимый уровень, зависящий от используемого сетевого стандарта. Современные линии связи строятся так, чтобы удовлетворить любому сетевому стандарту. Поэтому при их расчете и строительстве закладываются достаточно жесткие ограничения уровня ошибок (от  $BER = 10^{-11}$  до  $BER = 10^{-15}$ ). Рассмотрим работу фотоприемника. Являясь синхронизированным с приходящим оптическим сигналом, фотоприемник периодически в оптимальные моменты времени обрабатывает принимаемый сигнал – регистрирует интенсивность оптического сигнала и по пороговому значению определяет, 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:

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

Зададим достаточно жесткое ограничение уровня ошибок  $BER = 10^{-12}$  и, пользуясь выражением (3.1), найдем требуемое значение  $Q$ -фактора:

$$10^{-12} = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}};$$
$$Q = 7,03.$$

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

$$\frac{C}{Ш} = \frac{Q^2 \cdot \Delta f_E}{\Delta f_0}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta f_E$  – полоса пропускания электрического фильтра фотоприемника. Для систем WDM, обеспечивающих передачу потоков информации до 2,5 Гбит/с,  $\Delta f_E = 2,5$  ГГц;  $\Delta f_0$  – исходная спектральная полоса в оптическом диапазоне, которую можно принять равной ширине спектра узкополосного лазера. Обычно эта ширина не более 0,1 нм, что соответствует  $\Delta f_0 = 12,5$  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. Эта величина в технике связи обычно называется помехозащищенностью и определяется по формуле

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

Подставляя в формулу (3.3) значение отношения сигнал-шум, получаем

$$A'_3 = 10 \cdot \lg 9,88 = 9,95 \text{ дБ}.$$

Для расчетов примем  $A'_3 = 10$  дБ.

Данное значение справедливо для идеального фотоприемника. Ввиду 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  $A_{\text{зап}} = 5$  дБ, тогда

$$A_3 = A'_3 + A_{\text{зап}}. \quad (3.4)$$

Таким образом, требуемое значение помехозащищенности сигнала составляет  $A_3 = 10 + 5 = 15$  дБ.

## 3.2 Определение максимальной длины усилительного участка

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

В курсовом проекте рекомендуется использовать кабель, соответствующий рекомендации МСЭ-Т G.652. Для этого кабеля коэффициент затухания примем  $\alpha_k = 0,2$  дБ/км.

Затухание разъемного оптического соединителя примем [6]

$$A_p = 0,5 \text{ дБ.}$$

На каждом усилительном участке используются не более двух разъемных соединений, то есть  $n_p = 2$ .

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

$$A_{св} = 0,03 \text{ дБ.}$$

Строительная длина кабеля составляет 2–4 км, примем  $l_{стр} = 2$  км.

На регенерационном участке ввиду его большой протяженности (порядка 700–1000 км) и достаточно большого значения дисперсионного параметра  $D = 18$  пс/нм/км общая дисперсия будет составлять [7]

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

где  $L$  – длина регенерационного участка;  $\Delta \lambda$  – ширина спектра оптического источника (примем  $\Delta \lambda = 0,1$  нм).

При длине 700 км получим

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

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

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

где  $B$  – скорость передачи.

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

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

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

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

Длина волокна DCF  $L_2$  может быть вычислена по формуле [7]

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

где  $L_1$  – длина линии с обычным волокном;  $D_1$  и  $D_2$  – дисперсионные параметры обычного волокна и волокна DCF соответственно.

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

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

Затухание, вносимое волокном DCF, будет составлять

$$A_{к.д} = \alpha_{к.д} L_2;$$

$$A_{к.д} = -\frac{\alpha_{к.д} \cdot D_1 \cdot L_{ус}}{D_2}. \quad (3.7)$$

С учетом всех вышеприведенных рассуждений запишем формулу для определения длины усилительного участка, ограниченного потерями:

$$L_{\text{ус}} = \frac{q + \alpha_{\text{к.д}} \frac{L_{\text{ус}} \cdot D_1}{D_2} - A_{\text{р}} n_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}}};$$

$$L_{\text{ус}} = \frac{q - A_{\text{р}} n_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}}, \quad (3.8)$$

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

В курсовом проекте рекомендуется использовать усилитель Lucent с минимальной мощностью входного сигнала  $p_{\text{пр.мин}} = -30$  дБм. Ввиду 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 подразделе 2.4, где получено выражение

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

откуда для входного уровня  $p_{\text{вх}} = -28$  дБм

$$q = 29,6 \text{ дБ.}$$

Таким образом, мощность сигнала на выходе оптического усилителя составляет

$$p_{\text{пер}} = p_{\text{пр}} + q. \quad (3.9)$$

Подставим численные значения:

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

Воспользовавшись формулой (3.8), находим

$$L_{\text{ус}} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 96 \text{ км.}$$

### 3.3 Определение максимальной длины регенерационного участка

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

Таким образом:

$$P_{\text{ш.вх}} = (NF \cdot G - 1)h\nu \cdot \Delta\nu + h\nu \cdot \Delta\nu, \quad (3.10)$$

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 [7] примем  $\Delta\lambda = 0,1$  нм. По паспортным данным используемого ВОУ  $NF = 6$  дБ.

Определим частоту  $\nu$ , соответствующую длине волны  $\lambda = 1550$  нм:

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

где  $c = 299792458$  м/с (такое точное значение принято в рекомендации МСЭ-Т G.692 для преобразования частоты в длину волны и наоборот [15]). Подставляя числовые значения, получим

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

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

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

Учитывая, что  $NF \cdot G \gg 1$ , после простых преобразований выражения (3.10) получим

$$P_{\text{ш.вх}} = -69 + 10 \lg \Delta\nu + NF, \quad (3.11)$$

где частота  $\Delta\nu$  выражена в ГГц.

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

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

Рассмотрим методику нахождения результирующей помехозащищенности на участке регенерации, состоящем 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  $i$ -м участке

$$A_{zi} = P_{\text{при}i} - P_{\text{ш.вх}}, \quad (3.12)$$

где  $P_{\text{при}i}$  – уровень сигнала на входе  $i$ -го усилительного участка, определяемый по формуле

$$P_{\text{при}i} = P_{\text{пер}i} - \alpha l_i, \quad (3.13)$$

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

Таким образом,

$$A_{zi} = P_{\text{пер}i} - \alpha l_i - P_{\text{ш.вх}}. \quad (3.14)$$

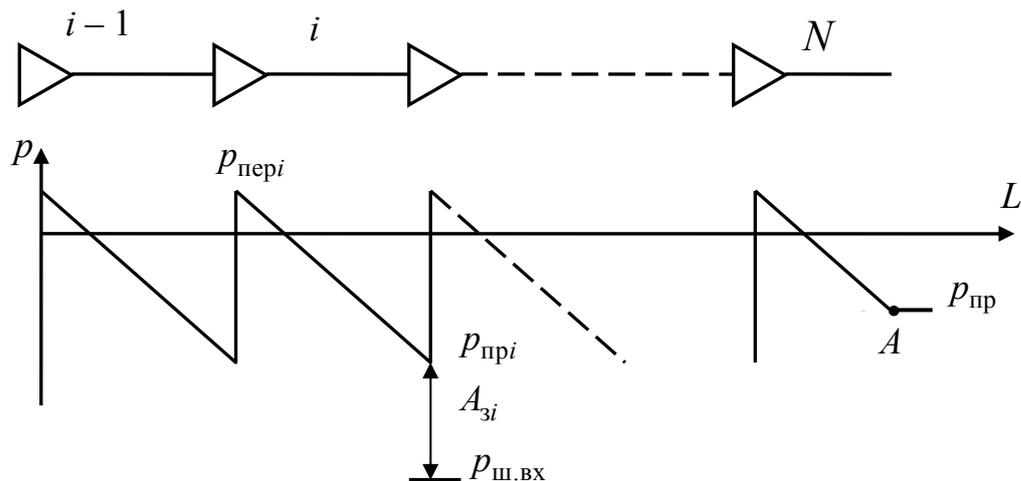


Рисунок 3.1 – Диаграмма уровней сигнала

В произвольной точке на выходе цепочки ВОУ с уровнем сигнала  $P_{\text{пр}}$  (очевидно, что в качестве такой точки следует при-

нять вход фотоприемника регенерационного пункта) помехозащищенность от шума, вносимого этим участком, не изменится и составит

$$A'_{zi} = p_{\text{пр}} - p_{\text{ш}i}, \quad (3.15)$$

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

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

$$\begin{aligned} p_{\text{пер}i} - \alpha l_i - p_{\text{ш.вх}} &= p_{\text{пр}} - p_{\text{ш}i}; \\ p_{\text{ш}i} &= p_{\text{пр}} + p_{\text{ш.вх}} - p_{\text{пер}i} + \alpha l_i. \end{aligned} \quad (3.16)$$

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

$$P_{\text{ш}i} = 10^{0,1 p_{\text{ш}i}} \text{ мВт.}$$

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

$$P_{\text{ш}\Sigma} = \sum_{i=1}^N 10^{0,1 p_i} = \sum_{i=1}^N 10^{0,1(p_{\text{пр}} + p_{\text{ш.вх}} - p_{\text{пер}i} + \alpha l_i)}. \quad (3.17)$$

В предположении, что каждый усилительный участок имеет одинаковые параметры (длину, затухание, мощность сигнала на входе и выходе оптического усилителя), в формуле (3.17) суммирование можно заменить на умножение.

Данный подход позволяет достаточно точно найти максимальную длину регенерационного участка, но требует после построения сети и определения основных параметров каждого усилительного участка рассчитать помехозащищенность спроектированного регенерационного участка. Итак, находим суммарную мощность шума:

$$P_{\text{ш}\Sigma} = N \cdot 10^{0,1(p_{\text{пр}} + p_{\text{ш.вх}} - p_{\text{пер}} + \alpha l)}; \quad (3.18)$$

$$P_{\text{ш}\Sigma} = 10 \lg N + p_{\text{пр}} + p_{\text{ш.вх}} - p_{\text{пер}} + \alpha l. \quad (3.19)$$

Защищенность в точке  $A$  составляет

$$A_{з.А} = p_{\text{пр}} - P_{\text{ш}\Sigma}.$$

Подставим в данное выражение формулу (3.19):

$$A_{3.A} = p_{\text{пр}} - 10 \cdot \lg N - p_{\text{пр}} - p_{\text{ш.вх}} + p_{\text{пер}} - \alpha l;$$
$$A_{3.A} = p_{\text{пер}} - 10 \lg N - p_{\text{ш.вх}} - \alpha l. \quad (3.20)$$

Формулу (3.20) 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  $L_{\text{ус}}$ :

$$q = \alpha l; \quad (3.21)$$

$$n = \frac{L}{L_{\text{ус}}}. \quad (3.22)$$

Таким образом, формула (3.20) примет вид

$$A_{3.A} = p_{\text{пер}} - q - p_{\text{ш.вх}} - 10 \lg \frac{L}{L_{\text{ус}}}. \quad (3.23)$$

Приняв в точке  $A$  требуемую помехозащищенность сигнала 15 дБ, запишем формулу (3.23) с учетом рассчитанных параметров:

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

Отсюда  $L = 794$  км.

Сегодня длины регенерационных участков линий связи составляют 700–1000 км.

## 4 СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ

### 4.1 Составление схемы организации связи

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

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

Как следует из рисунка 4.1, в пунктах А и Г используются ВОСП на основе STM-4 (S4) с окончанием на 2 тракта STM-1 (S1) и 126 трактов E1 (возможен вариант с окончанием на 2 тракта E4 или на 2 тракта STM-1 и 6 трактов E3).

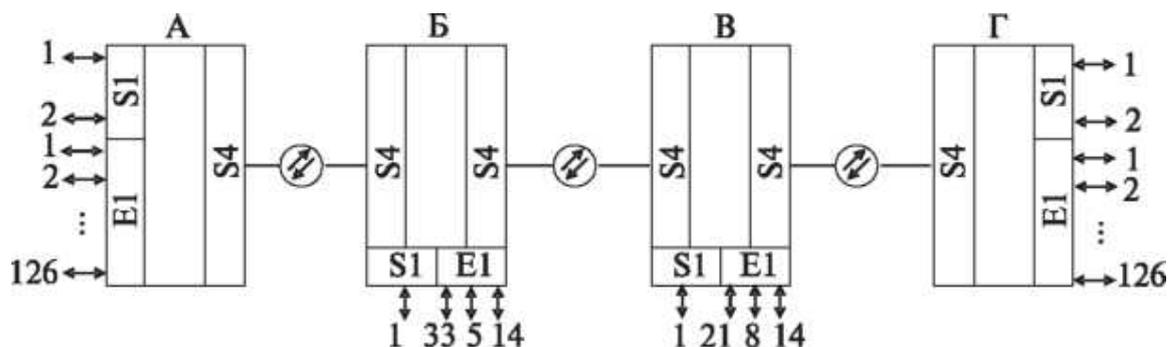


Рисунок 4.1 – Вариант схемы организации связи с использованием топологии «последовательная линейная цепь» и аппаратуры STM-4

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

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

## 4.2 Выбор аппаратуры ВОСП СЦИ и типа оптического кабеля

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

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

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

**I** – для внутриобъектовой связи (Intra);

**S** – для короткой межстанционной связи (Short);

**L** – для длинной межстанционной связи (Long);

**V** – для очень длинной межстанционной связи (Very long);

**U** – для сверхдлинной межстанционной связи (Ultra long);

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

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

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

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

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

**5** – номинальная длина волны 1550 нм и волокно G.655.

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

**В** – для внутриобъектовой связи;

**К** – для короткой межстанционной связи;

**Д** – для длинной межстанционной связи;

**О** – для очень длинной межстанционной связи;

**С** – для сверхдлинной межстанционной связи.

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

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

Параметр	Коды применения					
	I-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2	L-1.3
	I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3
	I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3
Номинальная длина волны, нм	1310	1310	1550	1310	1550	1550
Тип волокна <sup>1</sup>	G.652				G.652	G.653
Протяженность <sup>2</sup> , км	2	15	15	40	80	80
<sup>1</sup> Не исключается применение волокна G.655.						
<sup>2</sup> Ориентировочное значение						

Волоконно-оптические системы на основе СЦИ обладают универсальными возможностями и обеспечивают так называемую *поперечную совместимость*, т.е. возможность использования

оборудования различных производителей. Это привело к классификации *оптических стыков* – интерфейсов, как и оптических секций, по коду применения и нормированию их параметров в опорных точках (рисунки 4.2 и 4.3).

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

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

<sup>1</sup> Ориентировочное значение

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

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

<sup>1</sup> Ориентировочное значение

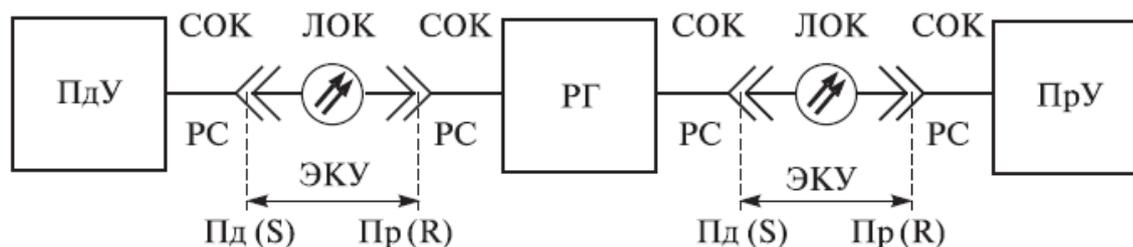


Рисунок 4.2 – Опорные точки нормирования стыков СЦИ без оптических усилителей Пд (S) и Пр (R)



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

На рисунках 4.2 и 4.3 обозначено:

ПДУ – передающее устройство (передатчик);

ПрУ – приемное устройство (приемник);

СОК – стационарный оптический кабель;

ЛОК – линейный оптический кабель;

РГ – регенератор;

ЭКУ – элементарный кабельный участок;

ОУпд – оптический усилитель мощности на передаче;

ОУпр – оптический усилитель на приеме;

ОУпм – оптический усилитель промежуточный (линейный);

РС – разъемный соединитель;

ПдОУ – передатчик с оптическим усилителем;

ПрОУ – приемник с оптическим усилителем.

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

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

- рабочий диапазон длин волн источника, в пределах которого может быть выбрана его длина волны; приемник должен иметь минимальный диапазон рабочих длин волн, который

соответствует максимальному допустимому диапазону длин волн источника; для каждого кода применения он выбирается исходя из типа оптического кабеля, характеристик источника излучения, суммарного затухания и суммарной дисперсии (материальной и волноводной) оптического тракта между опорными точками передатчика Пд (S) и приемника Пр (R);

*для передатчика (точка Пд или S):*

- тип источника излучения, который выбирается в зависимости от кода применения и параметров оптического волокна;
- максимальная ширина спектра излучения, которая определяется на уровне – 20 дБ относительно амплитуды на центральной длине волны источника излучения;
- максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения; среднеквадратическая ширина спектра излучения – стандартное отклонение спектрального распределения при нормальных условиях эксплуатации;
- уровень излучаемой мощности – уровень средней мощности псевдослучайного цифрового оптического сигнала в точке Пд (S) передатчика; значения этого параметра ограничиваются снизу и сверху соответственно минимальным уровнем и максимальным уровнем;

*для оптического тракта (между точками Пд и Пр или S и R):*

- максимальное значение перекрываемого затухания, которое определяется как разность между минимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и чувствительностью приемника с учетом наихудшего значения суммарных потерь между точками Пд (S) и Пр (R);
- минимальное значение перекрываемого затухания, которое определяется как разность между максимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и уровнем перегрузки приемника (минимальная перегрузка) с учетом наименьшего значения суммарных потерь между точками Пд (S) и Пр (R) при заданном коэффициенте ошибки;
- диапазон перекрываемого затухания, который определяется как диапазон от минимального до максимального значения затуханий оптического тракта между точками Пд (S) и Пр (R);

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

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

*для приемника (точка Пр или R):*

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

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

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

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

*Примечания к таблицам 4.4–4.6:*

<sup>1</sup> MLM – лазерный диод с многими продольными модами; <sup>2</sup> LED – светодиод; <sup>3</sup> SLM – лазерный диод с одной продольной модой; <sup>4</sup> н/п – не применяется; <sup>5</sup> меньшее значение относится к нижней границе, а большее – к верхней границе диапазона длин волн; <sup>6</sup> коэффициент ошибок не больше  $10^{-10}$ ; при коэффициенте ошибок  $10^{-12}$  максимальную чувствительность следует повысить на 1 дБ.

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

Таблица 4.4 – Параметры оптических интерфейсов STM-1

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

Таблица 4.5 – Параметры оптических интерфейсов STM-4

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

Таблица 4.6 – Параметры оптических интерфейсов STM-16

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

Таблица 4.7 – Параметры оптических интерфейсов STM-4 с ОУ

Параметр	Код применения					
	0-4.2 <sup>1</sup> (V-4.2)	0-4.2 <sup>2</sup> (V-4.2)	0-4.3 <sup>1</sup> (V-4.3)	0-4.3 <sup>2</sup> (V-4.3)	C-4.2 (U-4.2)	C-4.3 (U-4.3)
<i>Передачик в точке ГПд</i>						
Рабочий диапазон длин волн, нм	1530...1565					
Уровень излучаемой мощности, дБм:						
максимальный	13	4	13	4	15	15
минимальный	10	0	10	0	12	12
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Отношение оптических сигнал/шум (ООСШ), не менее, дБ	3	3	3	3	20	20
<i>Оптический тракт между точками ГПд и ГПр, ГПд и ГПр', Пд' и ГПр'</i>						
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	22...33	22...33	22...33	22...33	33...44	33...44
Отношение оптических сигнал/шум в точке Пд <sup>3</sup> k-го ОУ пм, не менее, дБ	3	3	3	3	н/п	н/п
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм	260	2400	260	400	3200	530
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	160	160	160	160	160	160
<i>Приемник в точке ГПр</i>						
Уровень чувствительности <sup>4</sup> , не более, дБм	-24	-34	-24	-34	-34	-33
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-9	-18	-9	-18	-18	-18
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ	1	1	1	1	2	1
<p><i>Примечания:</i> <sup>1</sup> при применении только ОУ пд; <sup>2</sup> при применении только ОУ пр; <sup>3</sup> определяется по формуле <math>ООСШ = 19+x+lgx</math> в точке ГПд и по формуле <math>ООСШ = 19+x - k+10 \lg(x/(k+1))</math> в точке Пд' (k-го ОУ пм), где x – число элементарных кабельных участков (при k промежуточных усилителях <math>x = k + 1</math>); <sup>4</sup> коэффициент ошибок не больше <math>10^{-12}</math></p>						

Таблица 4.8 – Параметры оптических интерфейсов STM-16 с ОУ

Параметр	Код применения					
	0-16.2 <sup>1</sup> (V-16.2)	0-16.2 <sup>2</sup> (V-16.2)	0-16.3 <sup>1</sup> (V-16.3)	0-6.3 <sup>2</sup> (V-16.3)	C-16.2 (U-16.2)	C-16.3 (U-16.3)
<i>Передачик в точке ГПд</i>						
Рабочий диапазон длин волн, нм;	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530-1565
Уровень излучаемой мощности, дБм:						
максимальный	13	4	13	4	15	15
минимальный	10	1	10	1	12	12
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Отношение оптических сигнал/шум (ООСП), не менее, дБ	3	3	3	3	20	20
<i>Оптический тракт между точками ГПд и ГПр, ГПд и Пр', Пд' и ГПр'</i>						
Диапазон перекрываемого затухания, дБ	22...33	22...33	22...33	22...33	33...44	33...44
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм	260	2400	400	400	3200	530
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	40	40	40	40	40	40
Отношение оптических сигнал/шум в точке Пд;						
<i>k</i> -го ОУ <sub>пм</sub> , не менее, дБ	3	3	3	3	н/п	н/п
<i>Приемник в точке ГПр</i>						
Уровень чувствительности <sup>4</sup> , не более, дБм	-24	-34	-24	-33	-34	-33
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-9	-18	-9	-18	-18	-18
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ	1	2	1	1	2	1
<p><i>Примечания:</i> <sup>1</sup> при применении только ОУ<sub>пд</sub>; <sup>2</sup> при применении только ОУ<sub>пр</sub>; <sup>3</sup> определяется по формуле <math>ООСП = 19 + x + 10 \lg x</math> в точке ГПд и по формуле <math>ООСП = 19 + x - k + 10 \lg[x/(k + 1)]</math> в точке Пд' (<i>k</i>-го ОУ<sub>пм</sub>), где <i>x</i> – число элементарных кабельных участков (при <i>k</i> промежуточных усилителях <math>x = k + 1</math>); <sup>4</sup> коэффициент ошибок не больше <math>10^{-12}</math></p>						

Таблица 4.9 – Параметры оптических интерфейсов STM-64 с ОУ

Параметр	Код применения				
	К-64.1 (S-64.1)	К-64.2 (S-64.2)	К-64.3 (S-64.3)	Д-64.2a <sup>1,2</sup> (L-64.2a,c)	Д-64.2b <sup>1,3</sup> (L-64.2b)
<i>Передачик в точке ГПд</i>					
Рабочий диапазон длин волн, нм;	1290...1330	1530...1565	1530...1565	1530...1565	1530...1565
Уровень излучаемой мощности, дБм:					
максимальный	2	2	2	1	13
минимальный	-1	-1	-1	-2	10
Ширина спектра на уровне -20 дБ, не более, нм	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Отношение оптических сигнал/шум (ООСШ), не менее, дБ	н/п	н/п	н/п	5	5
<i>Оптический тракт между точками ГПд' и ГПр', ГПд' и ГПр', Пд' и ГПр', Пд' и ГПр'</i>					
Диапазон перекрываемого заглухания, дБ	5...11	5...11	5...11	10...22	16...22
Хроматическая дисперсия, не более, пс/нм;	70	800	130	1600	1600
Суммарная поляризационная модовая дисперсия, не более, пс	10	10	10	10	10
Отношение оптических сигнал/шум в точке Пд' k-го ОУпм, не менее, дБ	н/п	н/п	н/п	5	5
<i>Приемник в точке ГПр</i>					
Уровень чувствительности <sup>4</sup> , не более, дБм	-13	-14	13	-26	-14
Уровень перегрузки, не менее, дБм	-3	-3	-3	-9	-3
Дополнительные потери оптического тракта, не более, дБ	1	2	1	2	2
<p><i>Примечания:</i> <sup>1</sup> для уменьшения дисперсии в оптическом тракте для кода применения Д-64.2а используются пассивный компенсатор дисперсии или принудительное импульсное смещение центральной частоты, а для кода применения Д-64.2б – самомодуляцию фазы;</p> <p><sup>2</sup> при применении только ОУпр; <sup>3</sup> при применении только ОУпд; <sup>4</sup> коэффициент ошибок не больше <math>10^{-12}</math>; <sup>5</sup> определяется по формулам примечания <sup>3</sup> к табл. 4.7 и 4.8</p>					

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

- отношение оптических сигнал/шум, которое определяется как отношение средней мощности оптического сигнала к средней мощности оптического шума усиленной спонтанной эмиссии (ASE) в точках ГПд и Пд' в полосе частот 1 нм рабочего диапазона длин волн;

- поляризационную модовую дисперсию, которая определяется как допустимое значение разности времен распространения двух взаимно-перпендикулярных поляризационных составляющих моды оптического сигнала в оптическом тракте (между точками ГПд и ГПр, ГПд и Пр', Пд' и Пр', Пд' и ГПр).

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

Таблица 4.10 – Параметры одномодовых оптических кабелей

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

Самым распространенным в мире одномодовым волокном является волокно G.652, часто называемое стандартным (Standard Fibre – SF). Это волокно имеет четыре категории: А, В, С и D, с немного отличающимися параметрами. Поэтому оптические кабели с волокном SF различных производителей также могут отличаться по характеристикам, причем, как правило, указываются значения параметров, улучшенные по сравнению с представленными в таблице 4.10. Аналогичное замечание можно сделать и в отношении волокна G.655.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОКГТ-МТ – оптический кабель линейный магистральный и внутризональный, встроенный в защитный трос. ОМ представляют собой центральную пластмассовую трубку с ОВ, заполненную гидрофобным компаундом по всей длине. На ОМ накладывается внутренний повив из круглых стальных оцинкованных проволок, затем алюминиевая оболочка и наружный повив чередующихся круглых стальных проволок с алюминиевым покрытием и проволок из алюминиевого сплава. Для подвески на ЛЭП путем встраивания в грозозащитный трос. Во всех кабелях СОКК используется ОВ G.652 фирмы «Корнинг». Количество ОВ от 4 до 32. Строительная длина ОК не менее 2 км.

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

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

На этой схеме пункты 1, 6 и 7 соединяются последовательной линейной цепью, а пункты 1, 2, 3, 4 и 5 соединяются кольцом. Расстояния между пунктами указаны в таблице 4.15, где приведены соответствующие этим расстояниям и предварительно выбранные коды применения.

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

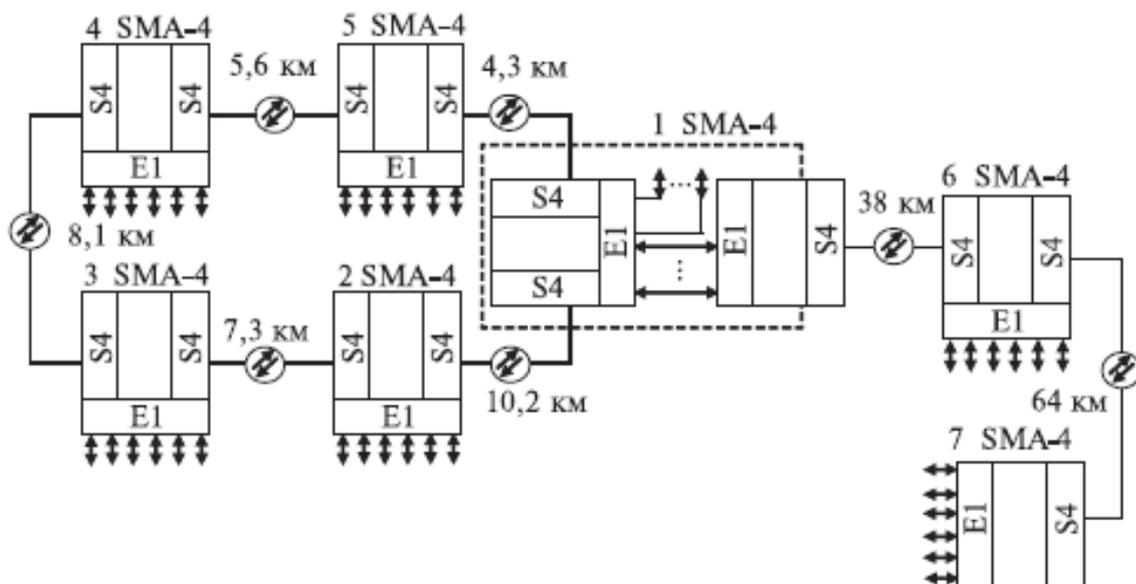


Рисунок 4.4 – Схема организации связи с использованием сетевых структур «кольцо» и «линейная последовательная цепь»

Таблица 4.15 – Расстояние между пунктами

Пункты	1–2	2–3	3–4	4–5	1–5	1–6	6–7
Расстояние, км	10,2	7,3	8,1	5,6	4,3	38	64
Код применения	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	L-4.1	L-4.2

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

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

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a}; \quad (4.1)$$

$$L_{\text{мин}_a} = \frac{A_{\text{мин}}}{a}, \quad (4.2)$$

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

Значения  $A_{\text{макс}}$  и  $A_{\text{мин}}$  для данного примера берутся из таблицы 4.5, а величина  $a$  – из таблицы 4.10. На основании этих таблиц имеем:

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

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

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

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

для кода применения S-4.1

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

для кода применения L-4.1

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

для кода применения L-4.2

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

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

для кода применения S-4.1

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

для кода применения L-4.1

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

для кода применения L-4.2

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

Выбранный интерфейс L-4.2, как следует из таблицы 4.5, на участке 6–7 не удовлетворяет требованию по максимальной

протяженности. Допустимую величину километрического затухания  $a_{\text{доп}}$  для такой секции определим из уравнения

$$L_{\text{макс}_a} = \frac{A_{\text{макс}}}{a}, \text{ решив его относительно } a. \text{ Для значений } A_{\text{макс}} = 24 \text{ дБ и } L_{\text{макс}} = 64 \text{ км получаем}$$

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

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

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

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

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

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

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

Величина  $E$  принимается равной:

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **4.4 Выбор и описание вариантов проектирования участков транспортной сети**

Рассмотрим подробно вариант курсового проекта, в котором необходимо спроектировать участок транспортной сети, который соединит города Москву и Чебоксары. На данном участке сети, построенном по топологии «точка – точка», предполагается выполнить процедуру ввода-вывода по два потока уровня STM-16 в городах Владимире и Нижнем Новгороде. Потребителями проектируемой сети связи будут предприятия, население, часть каналов будет предоставляться для передачи данных, телевизионных сигналов, сигналов телеконтроля в медицинских уч-

реждениях и сдаваться в аренду коммерческим операторам связи. Транспортная сеть должна быть ориентирована на любой вид пользовательской информации, включая сигналы PDH, ATM, Frame Relay, Ethernet.

Кроме того, спроектированный участок может являться началом проектирования и построения 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 того, технология волнового мультиплексирования позволяет наиболее полно использовать огромную пропускную способность оптического волокна.

Будем использовать систему волнового мультиплексирования Lambda Driver 1600.

Система Lambda Driver 1600 обеспечивает передачу до 16 независимых потоков информации со скоростью до 2,5 Гбит/с, каждый из них передается 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. Имеются два вида шасси Lambda Driver (LD800 и LD1600). Оба вида шасси Lambda Driver используют одни и те же универсальные транспондеры. Управление и мониторинг Lambda Driver осуществляется локально через порт RS-232 (DB9) или дистанционно по протоколам SNMP или Telnet через порт Ethernet 10/100 Мбит/с (RJ-45). Удаленное управление осуществляется через специальный канал (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, демультимплексоры и OADM для 1, 2, 4 или 8 длин волн. Такая гибкость дает операторам возможность снизить начальные вложения – сначала приобрести систему, работающую с несколькими длинами волн, а затем модернизировать ее по мере необходимости.

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

На проектируемом участке транспортной сети расстояние между Москвой и Чебоксарами составляет 674 км. В современных волоконно-оптических сетях длина регенерационного участка 700–1000 км. То есть организация связи между Москвой и Чебоксарами возможна без промежуточной регенерации сигнала. Это позволяет обойтись без процедуры оптоэлектронного преобразования, значительно усложняющей и удорожающей сеть. Затухание, вносимое кабелем и другими элементами, предполагается компенсировать усилителями на волокне, легированном эрбием (EDFA). Несмотря на позднее изобретение, EDFA первыми проникают на телекоммуникационный рынок и сегодня доминируют на нем. 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, он способен одновременно усиливать большое число независимых спектрально разделенных каналов, в то время как регенератор может обрабатывать только один канал, одну длину волны. Перечисленные преимущества оптического усилителя на-

столько значительны, что позволяют мириться с главным недостатком – дополнительным шумом, который он вносит.

При проектировании участка сети приходится учитывать 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 определенной инфраструктуры – наличия источника питания, помещения, защищенности узла, обслуживающего персонала. Типичные расстояния между усилителями составляют 40–100 км и более.

Каждый усилитель следует устанавливать вблизи городской зоны, так как для его работы требуется наличие источника питания. Кроме того, в случае выхода его из строя это сократит время прибытия обслуживающего персонала.

Трасса прокладки выбирается с учетом топографических трудностей, чтобы обойти преграды. Она располагается главным образом вдоль автомагистралей, чем повышается ее доступность для обслуживания и скорость строительства.

Для повышения надежности и качества передачи используется метод резервирования канала 1+1. В архитектуре 1+1 основной блок подключается то к рабочему, то к резервному каналу, что обеспечивает более высокое качество передачи. Кроме того, в последующем при построении между Москвой и Чебоксарами нового участка транспортной сети возможна организация резервного направления передачи, чтобы значительно увеличить надежность ВОЛС. При этом необходимо учесть, что выходная мощность системы волнового мультиплексирования с резервированием несколько ниже, чем без резервирования:  $P_{\text{пер}} = -5$  дБм.

Чувствительность используемого в проекте усилителя EDFA компании Lucent в режиме линейного усилителя и в режиме предусилителя

$$P_{\text{пр.мин}} = -30 \text{ дБм.}$$

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

## 4.5 Проектирование участка транспортной сети Москва – Чебоксары

### 4.5.1 Проектирование прямого направления (Москва – Чебоксары)

Энергетический потенциал усилительного участка с учетом эксплуатационного запаса определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}i-1} - A_{\text{зап}}, \quad (4.3)$$

где  $i$  – номер усилительного участка.

Выходная мощность системы Lambda Driver 1600 с учетом резервирования

$$p_{\text{пер}} = -5 \text{ дБм.}$$

Чувствительность EDFA в режиме линейного усилителя

$$p_{\text{пр.мин}} = -30 \text{ дБм.}$$

Соответственно энергетический потенциал первого усилительного участка

$$\mathcal{E}_1 = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр.мин}} - A_{\text{зап}} = -5 - (-30) - 2 = 23 \text{ дБм.}$$

Максимальная длина усилительного участка определяется по формуле

$$L_{\text{ус.макс}i} = \frac{\mathcal{E}_i - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}}. \quad (4.4)$$

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

Соответственно максимальная длина первого усилительного участка

$$L_{\text{ус.макс1}} = \frac{23 - 0,5 \cdot 1}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ км.}$$

Исходя из максимальной длины первого усилительного участка, для установки первого усилителя EDFA наиболее оптимально выбрать населенный пункт Электрогорск. Расстояние от Москвы до Электрогорска  $L_{\text{ycl}} = 72$  км.

Затухание, вносимое усилительным участком, определяется по формуле

$$A_i = L_{\text{ycl}i} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_{\text{p}} n_{\text{p}}. \quad (4.5)$$

Вычислим затухание, вносимое первым усилительным участком:

$$\begin{aligned} A_1 &= L_{\text{ycl}} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_{\text{p}} n_{\text{p}} = \\ &= 72 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 1 = 22,4 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Уровень мощности на выходе  $i$ -го участка

$$P_{\text{пр}i} = P_{\text{пер}i-1} - A_i. \quad (4.6)$$

Для первого участка

$$P_{\text{пр}1} = P_{\text{пер}} - A_1 = -5 - 22,4 = -27,4 \text{ дБм.}$$

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 подразделе 2.4):

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

Таким образом, при  $p_{\text{пр}1} = -27,4$  дБм получим

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

Отметим, что погрешность при определении значения коэффициента усиления составляет 0,1 дБ.

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

$$P_{\text{пер}i} = P_{\text{пр}i} + q_i. \quad (4.7)$$

Для первого усилительного участка

$$P_{\text{пер}1} = P_{\text{пр}1} + q_1 = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ дБм.}$$

Аналогично, пользуясь формулами (4.3)–(4.7), произведем расчет для следующих усилительных участков:

$$\mathcal{E}_2 = P_{\text{пр.мин}} + P_{\text{пер}1} - A_{\text{зап}} = 30 + 2,1 - 2 = 30,1 \text{ дБм;}$$

$$L_{\text{ус.макс}2} = \frac{\mathcal{E}_2 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{30,1 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 101 \text{ км.}$$

Местом расположения второго усилительного пункта выберем населенный пункт Хрястово, расстояние до которого от Электрогорска  $L_{\text{ус}2} = 99$  км.

Тогда

$$\begin{aligned} A_2 &= L_{\text{ус}2} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p = \\ &= 99 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,5 \text{ дБ;} \end{aligned}$$

$$P_{\text{пр}2} = P_{\text{пер}1} - A_2 = 2,1 - 29,5 = -27,4 \text{ дБм;}$$

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

$$P_{\text{пер}2} = P_{\text{пр}2} + q_2 = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ дБм.}$$

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

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

Методика расчета потерь приведена в [7]. Также необходимо учесть, соответствует ли уровень сигнала, поступающий на вход OADM1, динамическому диапазону приемника, который составляет от  $-3$  до  $-20$  дБм. Если уровень сигнала окажется выше динамического диапазона, то придется установить аттенюатор,

вносящий необходимое затухание, в противном случае – пред- усилитель.

Определим мощность на выходе OADM1  $L'_{yc3} = 20$  км.

Величины  $A'_3$ ,  $L'_{yc3}$  относятся к участку Хрястово – Влади- мир;  $A''_3$ ,  $L''_{yc3}$  – к участку Владимир – Дмитриево. Полная длина усилительного участка  $L_{yc3} = L'_{yc3} + L''_{yc3}$ . Выполним расчеты:

$$A'_3 = L'_{yc3} \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} \right) + A_p n_p = 20 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 0,5 \cdot 2 = 5,3 \text{ дБ};$$

$$p'_{пр3} = p_{пер2} - A'_3 = p'_{пр2} = 2,1 - 5,3 = -3,2 \text{ дБм.}$$

Полученная величина входного уровня полностью соответст- вует динамическому диапазону приемника. Значит никаких до- полнительных устройств устанавливать не потребуется. С учетом затухания, вносимого OADM, определим:

$$p'_{пер2} = p'_{пр2} - A_{OADM} = -3,2 - 4,5 = -7,7 \text{ дБ};$$

$$\mathcal{E}'_3 = p_{пр.мин} + p'_{пер2} - A_{зап} = 30 - 7,7 - 2 = 20,3 \text{ дБм};$$

$$L''_{yc.макс3} = \frac{\mathcal{E}'_3 - A_p n_p + L'_{yc3} \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2}}{\alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2}} =$$

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

Местом расположения третьего усилительного пункта выбе- рем населенный пункт Дмитриево, расстояние до которого от г. Владимира  $L''_{yc3} = 59$  км.

Таким образом, общая длина третьего усилительного участка

$$L_{yc3} = L'_{yc3} + L''_{yc3} = 20 + 59 = 79 \text{ км};$$

$$A_3'' = L_{\text{ус}3}'' \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} \right) - L_{\text{ус}3} \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} + A_{\text{р}} n_{\text{р}} =$$

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

$$p_{\text{пр}3} = p'_{\text{пер}2} - A_3'' = -7,7 - 20,3 = -28 \text{ дБм};$$

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

$$p_{\text{пер}3} = p_{\text{пр}3} + q_3 = -28 + 29,6 = 1,6 \text{ дБм};$$

$$\mathfrak{E}_4 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}3} - A_{\text{зап}} = 30 + 1,6 - 2 = 29,6 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс}4} = \frac{\mathfrak{E}_4 - A_{\text{р}} n_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 99 \text{ км.}$$

Местом расположения четвертого усилительного пункта выберем населенный пункт Гороховец, расстояние до которого от Дмитриево  $L_{\text{ус}4} = 98 \text{ км.}$

Выполним вычисления:

$$A_4 = L_{\text{ус}4} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_{\text{р}} n_{\text{р}} =$$

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

$$p_{\text{пр}4} = p_{\text{пер}3} - A_4 = 1,6 - 29,2 = -27,6 \text{ дБм};$$

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

$$p_{\text{пер}4} = p_{\text{пр}4} + q_4 = -27,6 + 29,5 = 1,9 \text{ дБм};$$

$$\mathfrak{E}_5 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}4} - A_{\text{зап}} = 30 + 1,6 - 2 = 29,4 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс}5} = \frac{\mathfrak{E}_5 - A_{\text{р}} n_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{29,4 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 95 \text{ км.}$$

Следующий усилитель EDFA разместим в Нижнем Новгороде, расстояние до которого  $L_{yc5} = 65$  км.

Кроме того, в этом пункте необходимо выполнить процедуру ввода-вывода двух потоков STM-16. Рассчитаем:

$$\begin{aligned} A_5 &= L_{yc5} \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p = \\ &= 65 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ дБ}; \\ p'_{пр5} &= p_{пер4} - A_5 = 1,9 - 20,3 = -18,4 \text{ дБм}. \end{aligned}$$

Полученный входной уровень мощности соответствует минимальной чувствительности приемного модуля OADM. С учетом затухания, вносимого OADM, определим

$$p_{пр5} = p'_{пр5} - A_{OADM} = -18,4 - 4,5 = -22,9 \text{ дБ}.$$

При  $p_{пр5} = -22,9$  дБм вычислим остальные параметры:

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

$$p_{пер5} = -22,9 + 28,9 = 5,6 \text{ дБ};$$

$$\mathcal{E}_6 = p_{пр.мин} + p_{пер5} - A_{зап} = 30 + 5,6 - 2 = 33,6 \text{ дБм};$$

$$L_{ус.макс6} = \frac{\mathcal{E}_6 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2}} = \frac{33,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 109 \text{ км}.$$

Местом расположения шестого усилительного пункта выберем населенный пункт Белозериха, расстояние до которого от г. Нижнего Новгорода  $L_{yc6} = 105$  км.

Тогда

$$\begin{aligned} A_6 &= L_{yc6} \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p = \\ &= 105 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 32,5 \text{ дБ}; \\ p_{пр6} &= p_{пер5} - A_6 = 5,6 - 32,5 = -26,9 \text{ дБм}; \end{aligned}$$

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

$$P_{\text{пер6}} = P_{\text{пр6}} + q_6 = -26,9 + 29,4 = 2,5 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_7 = P_{\text{пр.мин}} + P_{\text{пер6}} - A_{\text{зап}} = 30 + 2,5 - 2 = 30,5 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс7}} = \frac{\mathcal{E}_7 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} =$$

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

Местом расположения седьмого усилительного пункта выберем населенный пункт Юнга, расстояние до которого  $L_{\text{ус7}} = 98 \text{ км.}$

Рассчитаем:

$$A_7 = L_{\text{ус7}} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

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

$$P_{\text{пр7}} = P_{\text{пер6}} - A_7 = 2,5 - 29,2 = -26,7 \text{ дБм};$$

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

$$P_{\text{пер7}} = P_{\text{пр7}} + q_7 = -26,7 + 29,4 = 2,7 \text{ дБм.}$$

Определим уровень сигнала в г. Чебоксары:

$$L_{\text{ус8}} = 58 \text{ км};$$

$$A_8 = L_{\text{ус8}} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

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

$$P_{\text{пр8}} = P_{\text{пер7}} - A_8 = 2,7 - 18,3 = -15,4 \text{ дБм.}$$

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

Расчет показывает, что для построения прямого направления участка сети понадобится 7 усилителей EDFA и 10 территориальных центров (ТЦ). Более удобное отображение рассчитанных величин представлено в таблице 4.16.

Схема организации связи и диаграмма уровней ВОЛС Москва – Чебоксары показаны на рисунке 4.5.

Таблица 4.16 – Основные параметры ВОЛС Москва – Чебоксары

Населенный пункт	Москва	Элект-рогорск	Хряс-тово	Влади-мир	Дмит-риево
Усилительный участок	–	1	2	3	
$L_{ус}$ , км	–	72	99	79	
$L$ , км	–	72	99	20	59
$A$ , дБ	–	22,4	29,5	5,3	20,3
$p_{пр}$ , дБм	–	-27,4	-27,4	-3,2	-28
$p_{пер}$ , дБм	-5	2,1	2,1	-7,7	1,6
$q$ , дБ	–	29,5	29,5	-4,5	29,6

Населенный пункт	Горо-ховец	Н. Нов-город	Бело-зериха	Юнга	Чебоксары
Усилительный участок	4	5	6	7	8
$L_{ус}$ , 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
$p_{пр}$ , дБм	-27,6	-22,9	-26,9	-26,7	15,4
$p_{пер}$ , дБм	1,9	5,6	2,5	2,7	–
$q$ , дБ	29,5	28,5	29,4	29,4	–

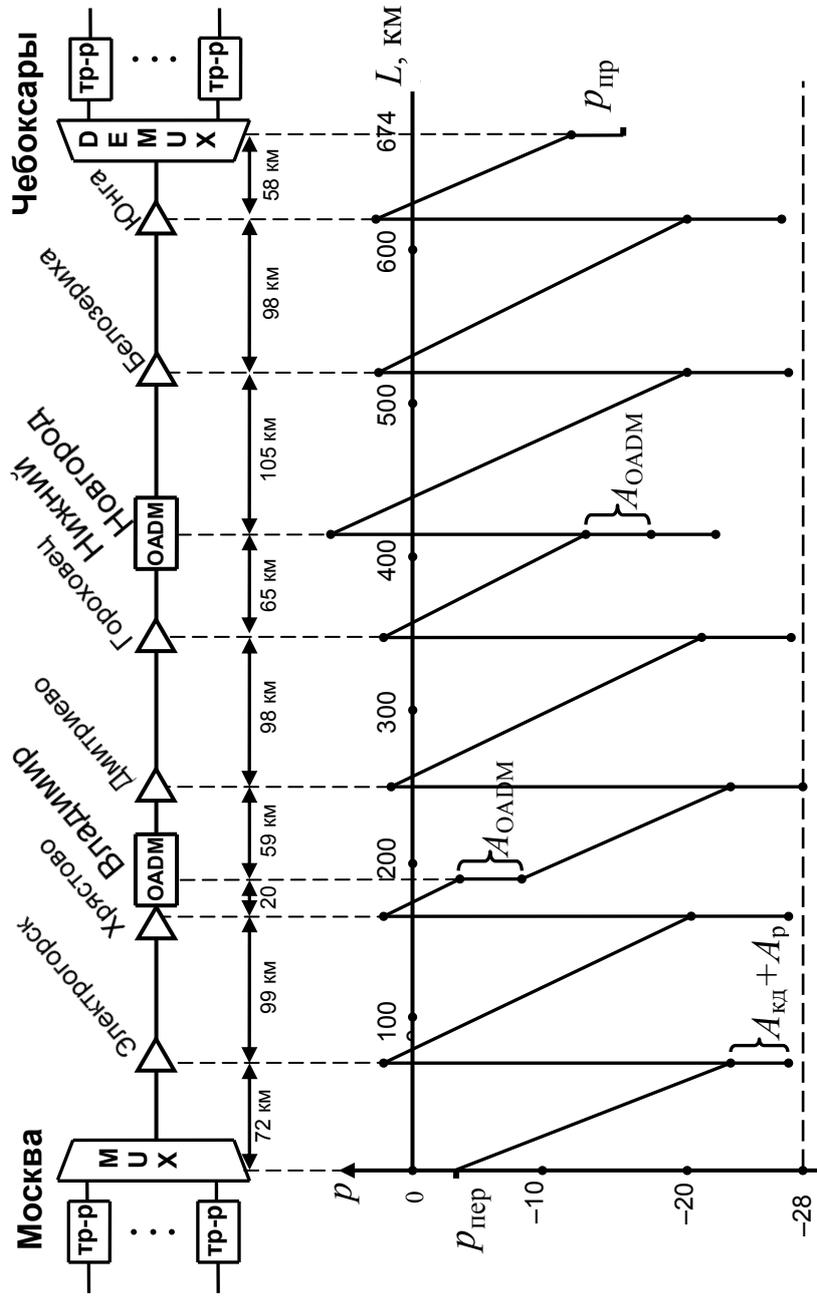


Рисунок 4.5 – Схема организации связи и диаграмма уровней ВОИС Москва – Чебоксары

### 4.5.2 Проектирование обратного направления (Чебоксары – Москва)

Расчет при проектировании обратного направления производится аналогично прямому:

$$p_{\text{пер}} = -5 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_1 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}} - A_{\text{зап}} = 30 - 5 - 2 = 23 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс1}} = \frac{\mathcal{E}_1 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{23 - 0,5 \cdot 1}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ км.}$$

Полученное значение энергетического потенциала позволяет разместить первый усилительный пункт в населенном пункте Юнга, расстояние до которого  $L_{\text{ус1}} = 58 \text{ км.}$

Выполним вычисления для этого участка:

$$A_1 = L_{\text{ус1}} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

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

$$p_{\text{пр1}} = p_{\text{пер}} - A_1 = -5 - 18,3 = -23,3 \text{ дБм};$$

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

$$p_{\text{пер1}} = p_{\text{пр1}} + q_1 = -23,3 + 28,6 = 5,3 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_2 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер1}} - A_{\text{зап}} = 30 + 5,3 - 2 = 33,3 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс2}} = \frac{\mathcal{E}_2 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{33,3 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 112 \text{ км.}$$

Значит, второй усилительный пункт можно разместить в населенном пункте Белозериха, расстояние до которого  $L_{\text{ус2}} = 98 \text{ км.}$

Рассчитаем параметры:

$$A_2 = L_{\text{ус}2} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_{\text{р}} n_{\text{р}} =$$

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

$$P_{\text{пр}2} = P_{\text{пер}1} - A_2 = 5,3 - 29,2 = -23,9 \text{ дБм};$$

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

$$P_{\text{пер}2} = P_{\text{пр}2} + q_2 = -23,9 + 28,7 = 4,8 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_3 = P_{\text{пр.мин}} + P_{\text{пер}2} - A_{\text{зап}} = 30 + 4,8 - 2 = 32,8 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс}3} = \frac{\mathcal{E}_3 - A_{\text{р}} n_{\text{р}}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{32,8 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 106 \text{ км.}$$

Полученное значение энергетического потенциала позволяет разместить третий усилительный пункт в Нижнем Новгороде, расстояние до которого  $L_{\text{ус}3} = 105 \text{ км}$ .

Тогда

$$A_3 = L_{\text{ус}3} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_{\text{р}} n_{\text{р}} =$$

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

$$P_{\text{пр}3} = P_{\text{пер}2} - A_3 = 4,8 - 32,5 = -27,7 \text{ дБм.}$$

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

$$p_{\text{пер}3} = p'_{\text{пер}3} - A_{\text{OADM}} = -3 - 4,5 = -7,5 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_4 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}3} - A_{\text{зап}} = 30 - 7,5 - 2 = 20,5 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс}4} = \frac{\mathcal{E}_4 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{20,5 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 65,5 \text{ км.}$$

Значит, четвертый усилительный пункт можно разместить в населенном пункте Гороховец, расстояние до которого  $L_{\text{ус}4} = 65 \text{ км.}$

Выполним расчет:

$$\begin{aligned} A_4 &= L_{\text{ус}4} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p = \\ &= 65 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ дБ}; \end{aligned}$$

$$p_{\text{пр}4} = p_{\text{пер}3} - A_4 = -7,5 - 20,3 = -27,8 \text{ дБм};$$

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

$$p_{\text{пер}4} = p_{\text{пр}4} + q_4 = -27,8 + 29,6 = 1,8 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_5 = p_{\text{пр.мин}} + p_{\text{пер}4} - A_{\text{зап}} = 30 + 1,8 - 2 = 29,8 \text{ дБм};$$

$$L_{\text{ус.макс}5} = \frac{\mathcal{E}_5 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{29,8 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 98 \text{ км.}$$

Рассчитанное значение энергетического потенциала позволяет разместить пятый усилительный пункт в населенном пункте Дмитриево, расстояние до которого  $L_{\text{ус}5} = 98 \text{ км.}$

Тогда

$$\begin{aligned} A_5 &= L_{\text{ус}5} \left( \alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2} \right) + 0,5 \cdot 2 = \\ &= 98 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 29,2 \text{ дБ}; \end{aligned}$$

$$p_{\text{пр}5} = p_{\text{пер}4} - A_5 = 1,8 - 29,2 = -27,4 \text{ дБм};$$

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

$$p_{\text{пер}5} = p_{\text{пр}5} + q_5 = -27,4 + 29,5 = 2,1 \text{ дБм.}$$

В г. Владимире необходимо установить оптический мультиплексор ввода-вывода OADM. Расстояние до Владимира  $L'_{\text{ус}6} = 59$  км.

Величины  $A'_6$ ,  $L'_{\text{ус}6}$  относятся к участку Дмитриево – Владимир;  $A''_6$ ,  $L''_{\text{ус}6}$  – к участку Владимир – Хрястово. Полная длина усилительного участка составляет  $L_{\text{ус}6} = L'_{\text{ус}6} + L''_{\text{ус}6}$ . Выполним расчет для этого участка:

$$A'_6 = L'_{\text{ус}6} \left( \alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} \right) + A_{\text{р}} n_{\text{р}} = 59 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} \right) + 0,5 \cdot 2 = 13,7 \text{ дБ};$$

$$p'_{\text{пр}6} = p_{\text{пер}6} - A'_6 = 2,1 - 13,7 = -11,6 \text{ дБм.}$$

Полученная величина входного уровня соответствует динамическому диапазону приемника. Значит, никаких дополнительных устройств устанавливать не потребуется. С учетом затухания, вносимого OADM, определим:

$$p'_{\text{пер}6} = p'_{\text{пр}6} - A_{\text{OADM}} = -11,6 - 4,5 = -16,1 \text{ дБ};$$

$$\mathcal{E}'_6 = p_{\text{пр.мин}} + p'_{\text{пер}6} - A_{\text{зап}} = 30 - 16,1 - 2 = 11,9 \text{ дБм};$$

$$L''_{\text{ус.макс}6} = \frac{\mathcal{E}'_6 - A_{\text{р}} n_{\text{р}} + L'_{\text{ус}6} \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}}{\alpha_{\text{к}} + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{\text{к.д}} D_1}{D_2}} = \frac{11,9 - 0,5 \cdot 2 - 59 \cdot \frac{1,56 \cdot 18}{340}}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 20 \text{ км.}$$

Шестой усилительный пункт можно расположить в населенном пункте Хрястово, расстояние до которого от г. Владимира  $L''_{\text{ус}6} = 20$  км.

Таким образом, общая длина третьего усилительного участка

$$L_{\text{ус}6} = L'_{\text{ус}6} + L''_{\text{ус}6} = 20 + 59 = 79 \text{ км.}$$

С учетом этого получим:

$$A_6'' = L_{ус6}'' \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} \right) - L_{ус6} \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2} + A_p n_p =$$

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

$$p_{пр6} = p'_{пер6} - A_6'' = -16,1 - 11,9 = -28 \text{ дБм};$$

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

$$p_{пер6} = p_{пр6} + q_6 = -28 + 29,6 = 1,6 \text{ дБм};$$

$$\mathcal{E}_7 = p_{пр.мин} + p_{пер6} - A_{зап} = 30 + 1,6 - 2 = 29,6 \text{ дБм};$$

$$L_{ус.макс7} = \frac{\mathcal{E}_7 - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2}} = \frac{29,6 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 99,5 \text{ км.}$$

Значит, седьмой усилительный пункт можно разместить в населенном пункте Электрогорске, расстояние до которого  $L_{ус7} = 99$  км.

Вычислим параметры для этого участка:

$$A_7 = L_{ус7} \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

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

$$p_{пр7} = p_{пер6} - A_7 = 1,6 - 29,5 = -27,9 \text{ дБм};$$

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

$$p_{пер7} = p_{пр7} + q_7 = -27,9 + 29,6 = 1,7 \text{ дБм.}$$

Определим уровень сигнала в Москве, расстояние до которой  $L_{ус8} = 72$  км:

$$A_8 = L_{ус8} \left( \alpha_k + \frac{A_{св}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{к.д} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

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

$$P_{\text{пр}8} = P_{\text{пер}7} - A_8 = 1,7 - 22,4 = -20,7 \text{ дБм.}$$

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

Расчет показывает, видим, что для построения обратного направления участка сети также понадобится 7 усилителей EDFA и 10 ТЦ. Для удобства сведем рассчитанные величины в таблицу 4.17.

Диаграмма уровней ВОЛС Чебоксары – Москва представлена на рисунке 4.6.

Таблица 4.17 – Основные параметры ВОЛС Чебоксары – Москва

Населенный пункт	Чебоксары	Юнга	Белозериха	Н. Новгород	Гороховец
Усилительный участок	–	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
Усилительный участок	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	–

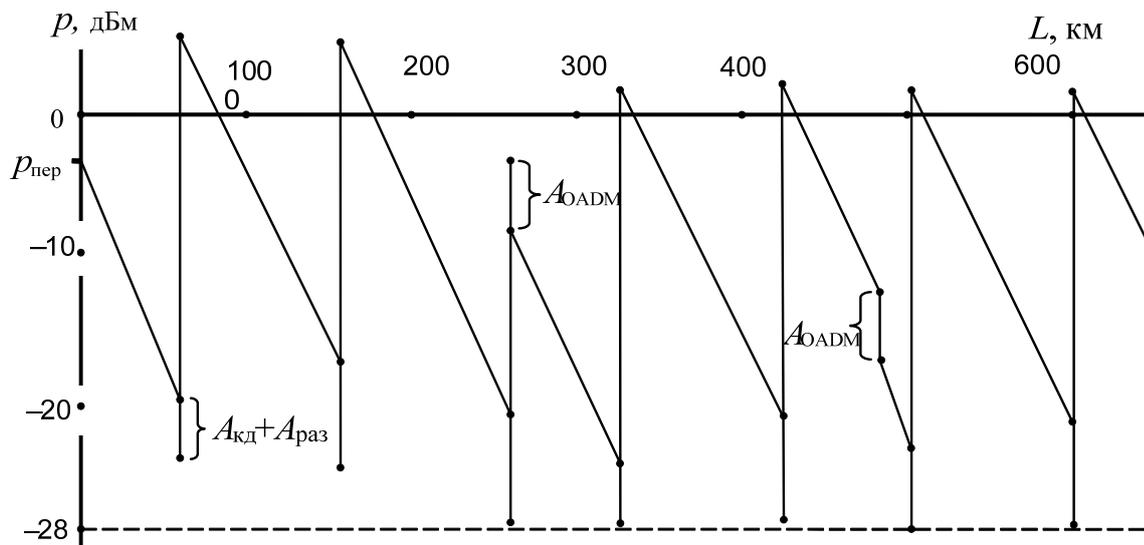


Рисунок 4.6 – Диаграмма уровней ВОЛС Чебоксары – Москва

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

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

#### 4.6 Определение помехозащищенности спроектированного участка транспортной сети

Определим помехозащищенность прямого направления транспортной сети.

Согласно формуле (3.12) помехозащищенность  $i$ -го участка составляет

$$A_{zi} = p_{при} - p_{ш.вх},$$

где  $p_{при}$  – уровень сигнала на входе  $i$ -го 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 Чебоксары – Москва сведены в таблицы 4.16 и 4.17.

Мощность помех (мВт) от  $i$ -го усилительного участка, приведенная к точке  $A$  (см. рисунок 3.1), определяется как

$$P_{\text{ш}i} = 10^{0,1(P_{\text{пр}} - A_{3i})}, \quad (4.8)$$

где  $p_{\text{пр}}$  – уровень сигнала в точке  $A$ .

По данной формуле определим мощность помех, приведенную к точке  $A$ , вносимых каждым участком. Результаты расчетов также приведены в таблицах 4.16, 4.17.

Суммарная мощность помех

$$P_{\text{ш}\Sigma} = \sum_{i=1}^8 P_{\text{ш}i} = 10^{-4} + 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-4} + 1,05 \cdot 10^{-4} + 3,55 \cdot 10^{-5} + \\ + 8,91 \cdot 10^{-5} + 7,94 \cdot 10^{-5} + 6,3 \cdot 10^{-6} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ мВт}. \quad (4.9)$$

Суммарный уровень помех

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

Защищенность сигнала в точке  $A$  определяется как

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

То есть защищенность сигнала для прямого направления участка транспортной сети составит

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

Определим суммарную мощность помех, приведенную к точке  $A$ , для обратного направления:

$$P_{\text{ш}\Sigma} = 1,15 \cdot 10^{-5} + 1,32 \cdot 10^{-5} + 3,16 \cdot 10^{-5} + 3,24 \cdot 10^{-5} + \\ + 2,95 \cdot 10^{-5} + 3,39 \cdot 10^{-5} + 3,31 \cdot 10^{-5} + 6,3 \cdot 10^{-6} = 1,92 \cdot 10^{-5} \text{ мВт}.$$

Суммарный уровень помех

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

Защищенность сигнала в точке  $A$  составит

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

Таким образом, минимальная помехозащищенность сети будет не ниже

$$A_{3,\text{сети}} = 16,5 \text{ дБм}.$$

Полученное значение помехозащищенности сигнала соответствует нормам, определенным в подразделе 3.1. Следовательно, на спроектированном участке транспортной сети заданное значение качества передачи будет выполнено.

## 5 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

---

### 5.1 Общие положения

Проблема надежности является одной из основных в современной технике, в том числе и в технике связи. В современных цифровых сетях ВОЛС по протяженности могут достигать многих тысяч километров. Основным конструктивным элементом 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. Ее 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 факторы подразделяют на внутренние и внешние. Это деление условно, так как четкую грань 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 короткого замыкания и молний (при наличии металлических элементов в ОК) и т.д.

Рассмотрим подробнее основные понятия и показатели надежности ОК, а также требования к надежности и коэффициенту готовности ВОЛС в целом. Учет требований к ОК по надежности

и основных факторов, влияющих на надежность ВОЛС, позволяет определять допустимые параметры надежности составных частей и участков. Такой подход дает возможность не 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.

Понятия надежности регламентированы государственным стандартом ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения». Приведем определения показателей надежности.

*Отказ кабеля* – 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 кабеля передавать электрические или оптические сигналы с заданными показателями качества, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

*Надежность кабеля (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 ВОЛС. Аналогично можно определить показатели надежности 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:

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

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:

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

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

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

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 среднему времени между отказами и 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 линии передачи;
- на участках линии с различными условиями должны применяться разные марки ОК, соответствующие 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 высокие показатели готовности должны обеспечиваться взаимным резервированием линий связи;
- показатели надежности и готовности элементов ВОЛС – муфт, оконечных устройств, цистерн, необслуживаемых регене-

рациональных 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 проектируемого участка первичной магистральной сети примем:

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

$$m_{К1} = 0,29;$$

- среднее время наработки на отказ одной строительной длины кабеля  $T_{К2} = 3225000$  ч;

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

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

$$K_{Г12500}^{\text{норм}} = 0,982.$$

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

- для модуля демультиплексора

$$T_{ДМ} = 70000 \text{ ч};$$

- для модуля мультиплексора

$$T_{М} = 87600 \text{ ч};$$

– для модуля мультиплексора ввода-вывода

$$T_{\text{МВВ}} = 105000 \text{ ч};$$

– для усилителя на волокне, легированном эрбием (EDFA),

$$T_{\text{ОУ}} = 70000 \text{ ч};$$

– для источника питания (при условии горячего резерва)

$$T_{\text{ИП}} = 78000 \text{ ч};$$

– для модуля управления

$$T_{\text{МУ}} = 61300 \text{ ч};$$

– для модуля транспондера

$$T_{\text{Тр}} = 61300 \text{ ч};$$

– для модуля резервирования 1+1 или сервисного модуля

$$T_{\text{МР}} = 61300 \text{ ч}.$$

## 5.4 Оценка надежности участка первичной магистральной сети

### 5.4.1 Оценка надежности работы линейно-кабельных сооружений

Суммарная интенсивность отказов линейно-кабельных сооружений включает:

▪ отказы из-за внешних причин (работа сторонних организаций, дефекты строительства, удары молнии, ливни и т. п.), характеризующиеся интенсивностью  $\lambda_{\text{к1}}$ ,  $\text{ч}^{-1} \cdot \text{км}$ ;

▪ внутренние отказы кабеля, характеризующиеся средним временем наработки на отказ или интенсивностью отказов одной строительной длины кабеля  $\lambda_{\text{к2}}$ ,  $\text{ч}^{-1}$ ;

▪ отказы УП за счет внешних повреждений, характеризующиеся интенсивностью  $\lambda_{\text{УП1}}$ ,  $\text{ч}^{-1}$ :

$$\Lambda_{\Lambda} = \lambda_{\text{к1}} L_{\text{к}} + \lambda_{\text{к2}} n_{\text{СД}} + \lambda_{\text{УП1}} n_{\text{УП}}, \quad (5.6)$$

где  $n_{\text{СД}}$  – количество строительных длин кабеля на трассе;  $n_{\text{УП}}$  – количество УП ( $n_{\text{УП}} = 12$ ).

Количество строительных длин определяется как

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

где  $l_{\text{СД}}$  – строительная длина кабеля ( $l_{\text{СД}} = 2$  км).

Тогда

$$n_{\text{СД}} = \frac{674}{2} = 337.$$

Среднее количество отказов  $\lambda_{\text{к1}}$  на один километр за один час определим, воспользовавшись значениями, представленными в подразделе 5.3:

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

Интенсивность отказов одной строительной длины кабеля

$$\lambda_{\text{к2}} = \frac{1}{3225000} = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}.$$

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

$$\lambda_{\text{УП}} = \frac{0,06}{8765} = 6,85 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Подставим все найденные значения в формулу (5.6):

$$\Lambda_{\Lambda} = 3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 674 + 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot 337 + 6,85 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \approx 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

Среднее время между отказами линейно-кабельных сооружений

$$T_{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda_{\Lambda}}, \quad (5.8)$$

или

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

Коэффициенты готовности и простоя определим по формулам (5.1) и (5.2). В соответствии с нормами среднее время восстановления кабеля, затрачиваемое на поиск причины и устранение отказа, составляет  $T_{\text{ВЛ}} = 7,2$  ч.

С учетом этого получим

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

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

### 5.4.2 Оценка надежности работы аппаратуры

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

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ОП}} &= 2(\lambda_{\text{М}} + \lambda_{\text{ДМ}} + \lambda_{\text{ИП}} + \lambda_{\text{МУ}} + \lambda_{\text{Тр}} + \lambda_{\text{МР}} + \lambda_{\text{ОУ}}) = \\ &= 2\left(\frac{1}{T_{\text{М}}} + \frac{1}{T_{\text{ДМ}}} + \frac{1}{T_{\text{ИП}}} + \frac{1}{T_{\text{МУ}}} + \frac{1}{T_{\text{Тр}}} + \frac{1}{T_{\text{МР}}} + \frac{1}{T_{\text{ОУ}}}\right). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Подставляя в формулу (5.9) показатели надежности используемой аппаратуры, получим

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

Среднее время между отказами для электронного оборудования ОП

$$T_{\text{А}}^{\text{ОП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ОП}}}, \quad (5.10)$$

или

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

Коэффициенты готовности и простоя для ОП:

$$K_{\Gamma}^{\text{ОП}} = \frac{T_{\text{А}}^{\text{ОП}}}{T_{\text{А}}^{\text{ОП}} + T_{\text{В}}^{\text{ОП}}}; \quad (5.11)$$

$$K_{\Pi}^{\text{ОП}} = \frac{T_{\text{В}}^{\text{ОП}}}{T_{\text{А}}^{\text{ОП}} + T_{\text{В}}^{\text{ОП}}} = 1 - K_{\Gamma}^{\text{ОП}}, \quad (5.12)$$

где  $T_{\text{В}}^{\text{ОП}}$  – время восстановления работоспособности ОП ( $T_{\text{В}}^{\text{ОП}} = 0,5$  ч).

Подставляя численные значения в формулы (5.11) и (5.12), получим

$$K_{\Gamma}^{\text{ОП}} = \frac{4916}{4916 + 0,5} = 0,99999;$$

$$K_{\Pi}^{\text{ОП}} = 1 - 0,9999 = 10^{-4}.$$

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

Суммарная интенсивность отказов для двух ПВВ определяется по формуле

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

Подставив в формулу (5.13) показатели надежности используемых компонентов, вычислим

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

Среднее время между отказами для оборудования ПВВ

$$T_{\text{А}}^{\text{ПВВ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ПВВ}}}, \quad (5.14)$$

или

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

Коэффициенты готовности и простоя для ПВВ:

$$K_{\Gamma}^{\text{ПВВ}} = \frac{T_{\text{А}}^{\text{ПВВ}}}{T_{\text{А}}^{\text{ПВВ}} + T_{\text{В}}^{\text{ПВВ}}}; \quad (5.15)$$

$$K_{\Pi}^{\text{ПВВ}} = \frac{T_{\text{В}}^{\text{ПВВ}}}{T_{\text{А}}^{\text{ПВВ}} + T_{\text{В}}^{\text{ПВВ}}} = 1 - K_{\Gamma}^{\text{ПВВ}}, \quad (5.16)$$

где  $T_{\text{В}}^{\text{ПВВ}}$  – время восстановления работоспособности ПВВ ( $T_{\text{В}}^{\text{ПВВ}} = 0,5$  ч).

Подставляя в формулы (5.15), (5.16) численные значения, получим

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

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

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

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

Подставив в данную формулу показатели надежности используемых компонентов, вычислим

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

Среднее время между отказами для оборудования УП

$$T_{\text{А}}^{\text{УП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{УП}}}, \quad (5.18)$$

или

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

Коэффициенты готовности и простоя для УП:

$$K_{\Gamma}^{\text{УП}} = \frac{T_{\text{А}}^{\text{УП}}}{T_{\text{А}}^{\text{УП}} + T_{\text{В}}^{\text{УП}}}; \quad (5.19)$$

$$K_{\Pi}^{\text{УП}} = \frac{T_{\text{В}}^{\text{УП}}}{T_{\text{А}}^{\text{УП}} + T_{\text{В}}^{\text{УП}}} = 1 - K_{\Gamma}^{\text{УП}}, \quad (5.20)$$

где  $T_{\text{В}}^{\text{УП}}$  – время восстановления работоспособности УП.

В связи с тем что места расположения УП выбирались только вблизи населенных пунктов, время восстановления их работоспособности  $T_{\text{в}}^{\text{УП}} = 1$  ч.

Тогда

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

$$K_{\Pi}^{\text{УП}} = 1 - 0,99968 = 3,2 \cdot 10^{-4}.$$

Суммарная интенсивность отказов аппаратуры

$$\Lambda_{\text{А}} = \lambda_{\text{ОП}} + \lambda_{\text{ПВВ}} + \lambda_{\text{УП}}, \quad (5.21)$$

или

$$\Lambda_{\text{А}} = 20,34 \cdot 10^{-5} + 12,07 \cdot 10^{-5} + 3,25 \cdot 10^{-4} \approx 6,49 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициент простоя аппаратуры

$$K_{\Pi\text{А}} = K_{\Pi}^{\text{ОП}} + K_{\Pi}^{\text{ПВВ}} + K_{\Pi}^{\text{УП}}, \quad (5.22)$$

или

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

Коэффициент готовности аппаратуры

$$K_{\Gamma\text{А}} = 1 - K_{\Pi\text{А}}, \quad (5.23)$$

или

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

### 5.4.3 Оценка работы надежности участка сети с учетом линейных сооружений и аппаратуры

Коэффициент готовности спроектированного участка транспортной сети

$$K_{\Gamma\text{С}} = 1 - K_{\Pi\text{Л}} - K_{\Pi\text{А}}, \quad (5.24)$$

или

$$K_{\Gamma\text{С}} = 1 - 0,00294 - 0,00048 = 0,9966.$$

При определении показателя надежности для участка транспортной сети воспользуемся значением  $K_{\Gamma 12500}^{\text{норм}} = 0,982$ .

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

$$K_{rL}^{\text{норм}} = \left( K_{rl}^{\text{норм}} \right)^{L/l}, \quad (5.25)$$

или

$$K_{rl}^{\text{норм}} = \left( K_{rL}^{\text{норм}} \right)^{l/L}.$$

Для проектируемого участка сети  $l = 674$  км

$$K_{rl}^{\text{норм}} = (0,92)^{674/12500} = 0,9955.$$

Сопоставив значения показателей надежности для проектируемой сети с требуемыми значениями, можно сделать вывод, что спроектированный участок сети по надежности соответствует нормам.

Для обеспечения надежности транспортной сети, соответствующей требованиям перспективной цифровой сети ( $K_{rl}^{\text{персп}} = 0,999$ ), необходимо создать топологическую структуру, имеющую резервные направления передачи, поскольку отказы в сети обусловлены главным образом отказами в линейно-кабельных сооружениях, а именно внешними повреждениями.

## 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. Рассмотрим 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);
- приемопередатчики (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.

На тестируемый компонент подают оптический сигнал с известными параметрами, а затем изучают выходной сигнал и определяют, чем он отличается от входного. 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.

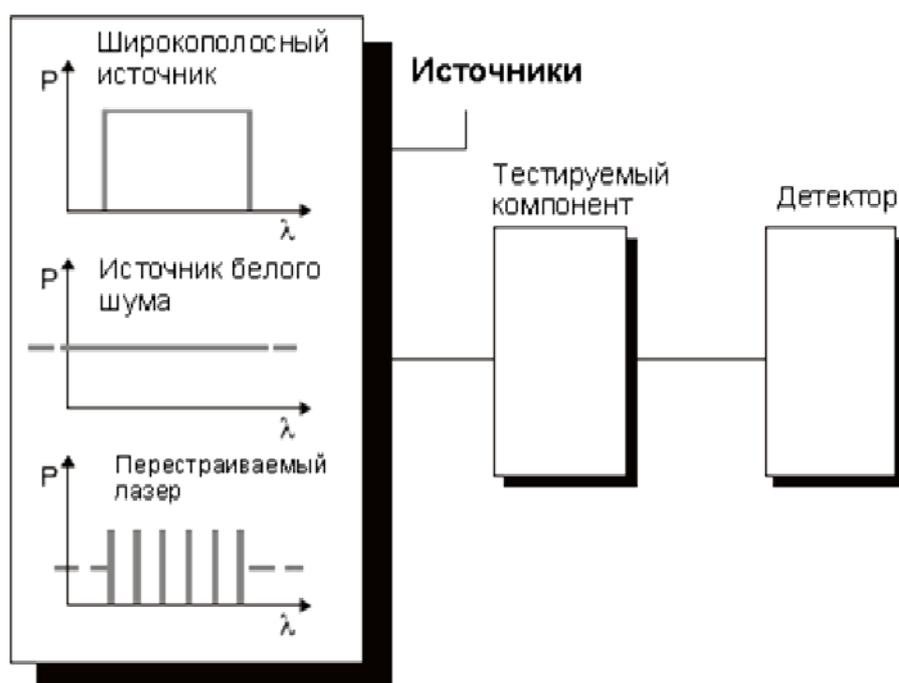


Рисунок 6.1 – Измерительная установка с идеальными источниками излучения

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 и приемники для тестирования

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

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

Для измерений необходимы широкополосные источники с достаточно равномерным 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 пикометров) 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 рисунке 6.2.

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.

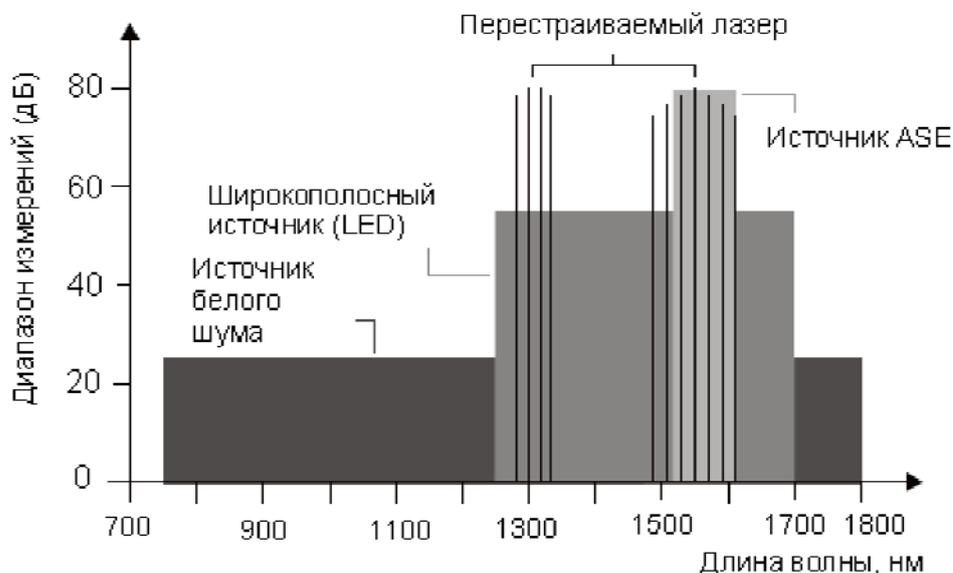


Рисунок 6.2 – Спектральная область излучения и динамический диапазон источников различных типов

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 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 ди-

намический диапазон, необходимый для большинства случаев измерения потерь, а также малую чувствительность к поляризации.

## 6.4 Анализаторы оптического спектра

На рисунках 6.3–6.5 показаны способы выделения длин волн, которые используются для анализа оптического спектра.

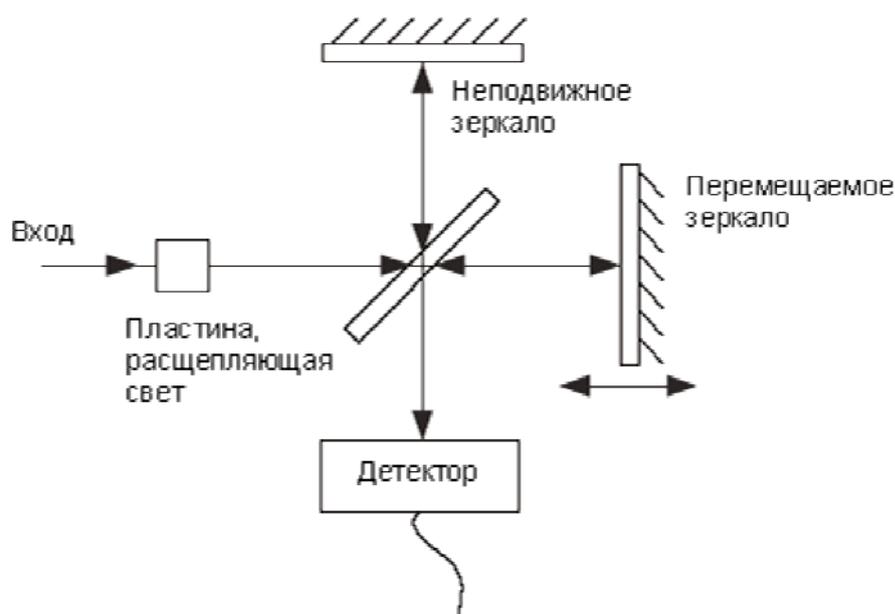


Рисунок 6.3 – Метод интерференции двух пучков света с использованием перемещаемого зеркала

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 позволяет получить спектр исходного сигнала.

В другом подходе (см. рисунок 6.4) 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.

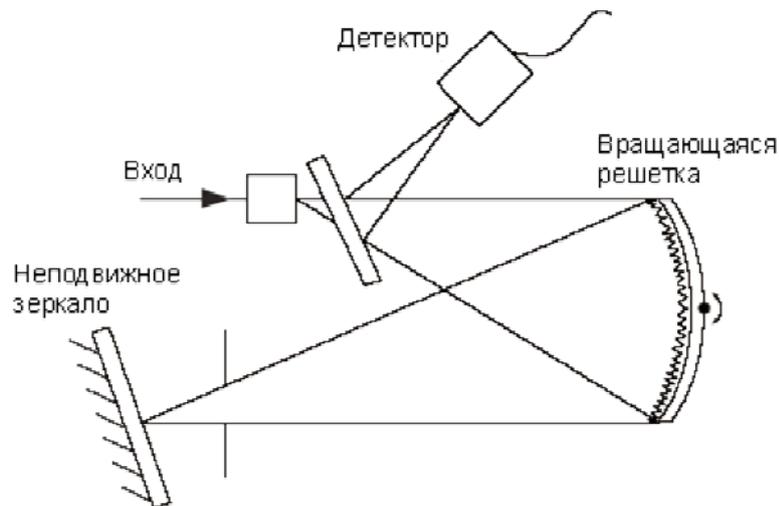


Рисунок 6.4 – Метод с вращающейся дисперсионной решеткой

Третий способ (см. рисунок 6.5) аналогичен предыдущему, но в данной конструкции решетка закреплена. Отраженные решеткой спектральные составляющие входного пучка распределяются по линейке отдельных фотодетекторов (или попадают на одиночный перемещаемый фотодетектор).

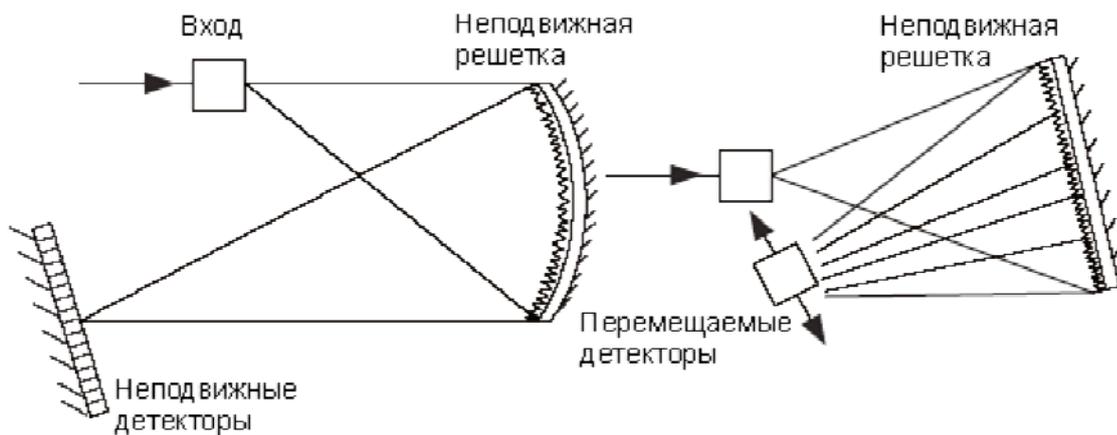


Рисунок 6.5 – Метод с фиксированной дисперсионной решеткой

Перечислим важнейшие характеристики анализатора оптического спектра.

- **Динамический диапазон** – определяет возможность измерения амплитуд сигналов в широком диапазоне. Большой дина-

мический диапазон может потребоваться, например, при исследовании полосы пропускания оптического канала, когда важны аномальные характеристики боковой полосы, уровень мощности которой ниже уровня основного сигнала более чем на 50 дБ.

- 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 требования, предъявляемые к выполнению конкретного измерения.

## **6.5 Измерители длины волны**

Измеритель длины волны представляет второй тип приемника с избирательностью по длинам волн. По сути, он является интерферометром Майкельсона (см. рисунок 6.3). 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 и быстрого тестирования каналов. Точная информация об относительной длине волны извлекается из сигнала методами быстрого преобразования Фурье, а привязка к абсолютной длине волны производится по встроенному в прибор гелий-неоновому (He-Ne) лазеру. В итоге абсолютная точность измерений довольно высока (лучше 0,005 нм) и вполне достаточна для исследования спектрального распределения каналов, например, в 80-канальных системах WDM.

Измеритель длин волн имеет ограниченный динамический диапазон измерений (чуть больше 30 дБ), которого не хватает 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.

## **6.6 Тестирование мультиплексоров и демультиплексоров**

Существует много способов объединения широкополосных и перестраиваемых источников и приемников для измерения зависимости параметров компонентов систем WDM от длины волны. Рассмотрим на примере многосторонней задачи тестирования мультиплексора (демультиплексора) наиболее распространенные конфигурации.

### **Вносимые потери**

На рисунке 6.6 изображена типовая установка для определения вносимых потерь мультиплексора/демультиплексора. На вход мультиплексора/демультиплексора подаются сигнал широкополосного источника ASE, спектр которого равномерен и покры-

вает 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  $1 \times N$ . Все компоненты измерительной системы должны обладать низкой чувствительностью к состоянию поляризации светового сигнала.

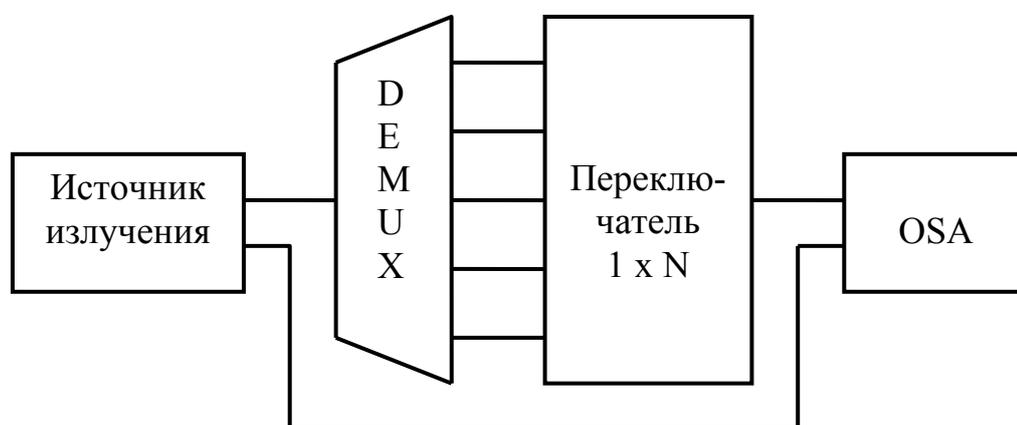


Рисунок 6.6 – Установка для определения вносимых потерь мультиплексора/ демультиплексора

### 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, поэтому

кривая потерь может быть определена с разрешением лучше 0,001 нм в большом динамическом диапазоне (рисунок 6.7,*а*).

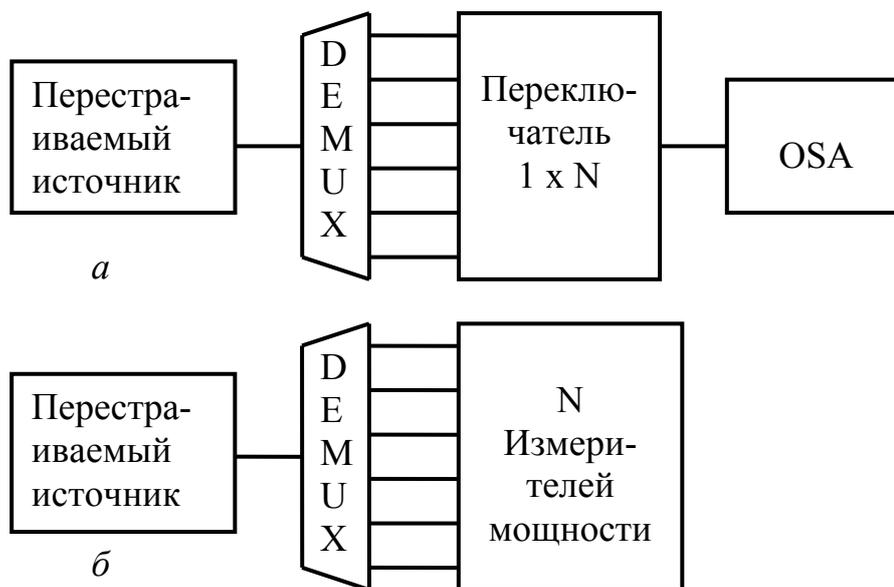


Рисунок 6.7 – Измерение перекрестных помех с помощью перестраиваемого лазера: *а* – с анализатором OSA; *б* – с измерителями мощности

### 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, затем в измерительную схему вводят 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 6.8). Однако из-за ограниченного динамического диапазона OSA трудно проследить волновую зависимость ORL при уровне ниже  $-40$  дБ.

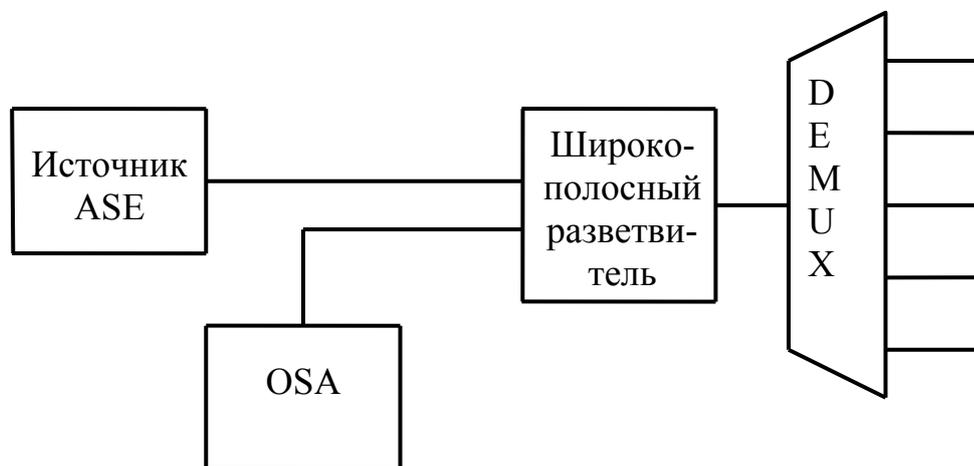


Рисунок 6.8 – Измерение зависимости ORL от длины волны

### Измерение полосы пропускания

Для измерения оптической полосы пропускания используется процедура, аналогичная процедуре измерения вносимых потерь. От спектральной характеристики измерительной системы можно избавиться при помощи опорного измерения. На рисунке 6.9 показана типовая измерительная установка.

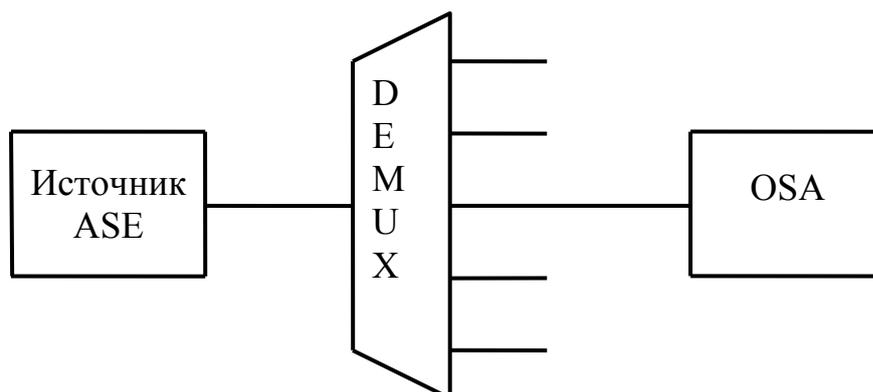


Рисунок 6.9 – Измерение полосы пропускания

## 6.7 Тестирование оптических источников и приемников

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 данных параметров. Для этого используются волновые измерители и высокоскоростные измерители мощности излучения с большой скоростью выборки и соответствующие оптические переключатели.

На рисунке 6.10 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 посредством оптического переключателя  $1 \times 4$ .

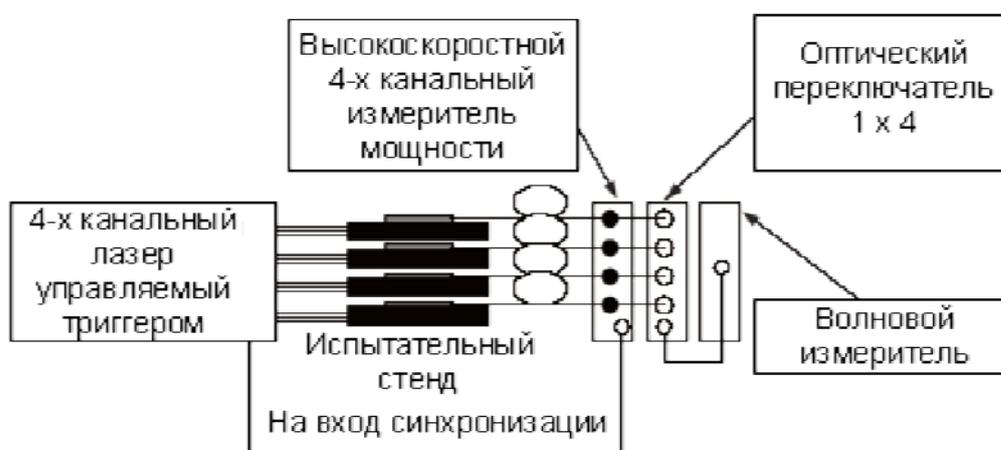


Рисунок 6.10 – Измерение характеристик лазерного источника

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 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.

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 расширения 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 6.11 показана типовая конфигурация для измерения нелинейностей методом суперпозиции. Эту схему можно легко автоматизировать.

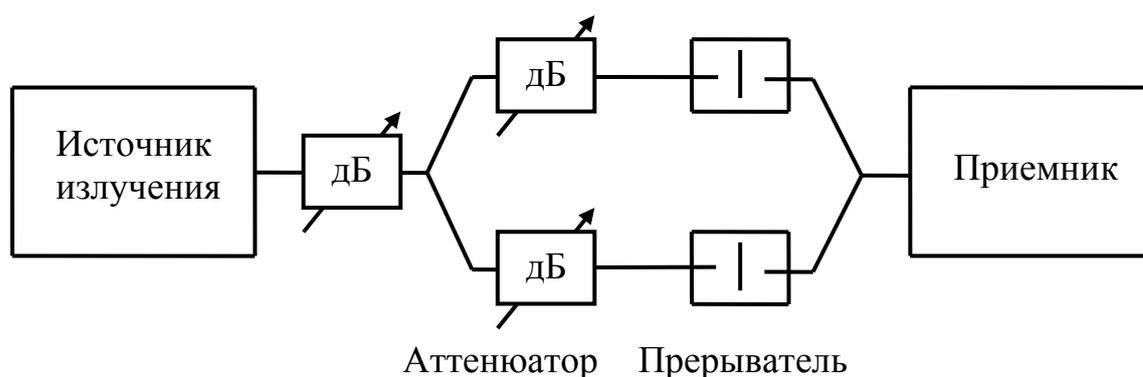


Рисунок 6.11 – Автоматизированная схема определения временных характеристик и чувствительности приемника

## Литература

1. Оптические телекоммуникационные системы: учеб. для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шафарутдинов ; под ред. В.Н. Гордиенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 368 с.

2. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс]: учеб. пособие / О.К. Скляр. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2018. – 268 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959> (дата обращения: 20.06.2018).

3. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи: учеб. пособие для вузов / Э.Л. Портнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 544 с.

4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: учеб. для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов, В.И. Иванов, В.А. Бурдин, А.В. Крыжановский, Л.А. Марыкова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 424 с.

5. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2016. – 440 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75523> (дата обращения: 20.06.2018).

6. Листвин В.Н. DWDM-системы / В.Н. Листвин, В.Н. Трещиков. – М.: Техносфера, 2017. – 352 с.

7. Гордиенко В.Н. Многоканальные телекоммуникационные системы: учеб. для вузов / В.Н. Гордиенко, М.С. Тверецкий. – М.: Горячая линия, 2015. – 396 с.

8. РД 45.195-2001. Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно : введ. в действие с 01.10.01. – М.: Минсвязи России, 2001.

9. РД 45.286-2002. Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования : введ. в действие 29.08.02. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 2002.

10. МСЭ-Т М.2101. Нормы на качественные характеристики трактов и секций мультиплексирования СЦИ при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации. – 2000, июнь.

11. МСЭ-Т G.828. Нормы на параметры ошибок международных трактов СЦИ постоянной скорости. – 2000, март.

12. МСЭ-Т G.829. Параметры ошибок мультиплексных и регенерационных секций СЦИ. – 2000, март.

13. МСЭ-Т G.957 (06/99). Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии.

14. МСЭ-Т G.691 (10/2000). Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии с оптическими усилителями.

15. МСЭ-Т G.692 (10/1998). Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями.

## Список сокращений

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи

ВОУ – волоконно-оптический усилитель

КЛС – кабельные линии связи

ОВ – оптическое волокно

ОК – оптический кабель

ОП – оконечный пункт

ОЦТС – оптические цифровые телекоммуникационные системы

СЦИ – синхронная цифровая иерархия

УП – усилительный пункт

## Приложение А

### Пример технического задания на курсовое проектирование

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

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ № \_\_\_**

на курсовой проект по дисциплине

Оптические цифровые телекоммуникационные системы  
студенту РТФ гр. 154 Иванову Ивану Ивановичу

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

**1. Срок сдачи работы:** « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

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

**3. Исходные данные для проектирования**

3.1. Конечные административные пункты ВОСП: \_\_\_\_\_

3.2. Число цифровых каналов связи: \_\_\_\_\_

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

#### **4. Вопросы, подлежащие разработке**

##### 4.1. Схема организации связи

4.1.1. Составление схемы организации связи

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

4.1.3. Выбор аппаратуры и типа ОК ВОСП

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

##### 4.2. Расчет длины регенерационного и усилительного участков

4.2.1. Определение необходимого качества передачи системы связи

4.2.2. Определение максимальной длины усилительного участка

4.2.3. Определение максимальной длины регенерационного участка

4.2.4. Проектирование прямого направления

4.2.5. Проектирование обратного направления

4.2.6. Определение помехозащищенности спроектированного участка сети

#### **5. Содержание пояснительной записки**

**Пояснительная записка оформляется строго по ОС ТУСУР 01-2013.**

5.1. Титульный лист

5.2. Реферат

5.3. Лист задания с подписью преподавателя

5.4. Содержание

5.5. Введение (*с указанием цели и задач проекта*)

5.6. Основная часть (*с выводами по каждому разделу*)

5.7. Заключение (*с указанием полученных результатов и их сопоставлением с требованиями технического задания*)

5.8. Список использованной литературы

## 5.9. Приложения

### 6. Графический материал

6.1. Схема организации связи

6.2. Диаграмма уровней сигналов

### 7. Рекомендуемая литература

7.1. Оптические телекоммуникационные системы: учебник для вузов / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафудинов ; под ред. В. Н. Гордиенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 368 с.

7.2. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс]: учеб. пособие / О.К. Скляр. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2018. – 268 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959> (дата обращения: 20.06.2018).

7.3. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. – Томск: ТУСУР, 2013. – 53 с.

Дата выдачи задания: «\_\_»\_\_\_\_\_ 201\_ г.

Руководитель проекта:

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Задание принял к исполнению:

студент гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Учебное издание  
**Перин Антон Сергеевич**  
**Шарангович Сергей Николаевич**  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
Учебное пособие

Подписано в печать 25.09.19. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 6,75. Тираж 100 экз. Заказ 362.

---

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