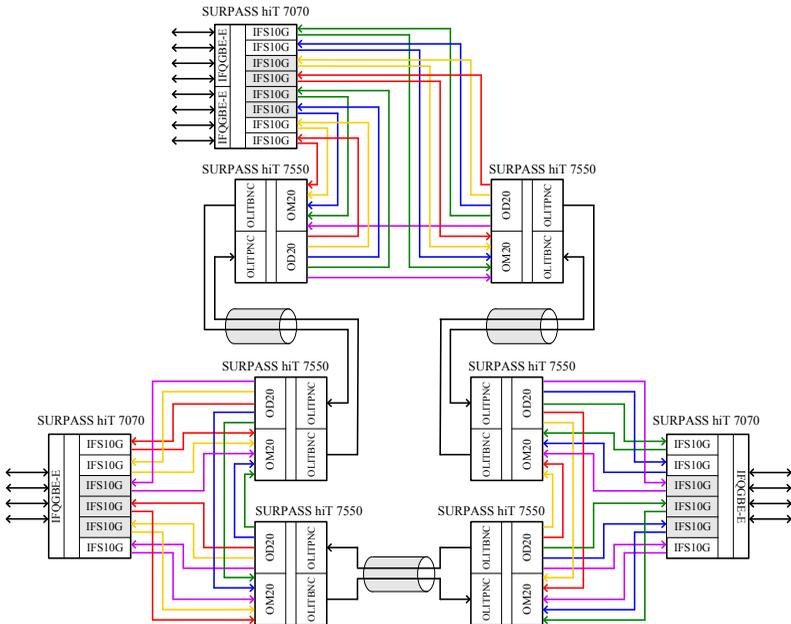


П. М. БУЙ, Н. Ф. СЕМЕНЮТА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Системы передачи информации»

П. М. БУЙ, Н. Ф. СЕМЕНЮТА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*Одобрено методической комиссией электротехнического факультета
в качестве учебно-методического пособия по курсовому и дипломному
проектированию для студентов специальности 1-37 02 04 «Автоматика,
телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»*

Гомель 2014

УДК 621.372.8(075.8)

ББК 32.86-01

Б90

Рецензенты: зав. кафедрой «Системы передачи информации» доцент *В. Г. Шевчук* (УО «БелГУТ»); доцент кафедры «Электрическая связь», кандидат технических наук *В. П. Глушко* (УО «ЛИИЖТ»), Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Буй, П. М.

Б90 Проектирование волоконно-оптической сети связи железной дороги : учеб.-метод. пособие / П. М. Буй, Н. Ф. Семенюта ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 99 с.

ISBN 978-985-554-344-3

Излагаются вопросы проектирования волоконно-оптической связи по дисциплинам «Многоканальные системы передачи информации» и «Цифровые телекоммуникационные сети». Приведены структура первичной волоконно-оптической цифровой сети связи железной дороги, особенности ее проектирования, расчет оптических параметров линейного тракта, основных параметров надежности и др.

Предназначено для студентов специальности 1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

УДК 621.372.8(075.8)

ББК 32.86-01

ISBN 978-985-554-344-3

© Буй П. М., Семенюта Н. Ф., 2014

© Оформление. УО «БелГУТ», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Белорусская железная дорога и транспортно-логистическая система Республики Беларусь	8
2 Выбор топологии построения волоконно-оптической сети связи	11
3 Структура волоконно-оптической сети связи и расчет каналов на ее участках	16
4 Резервирование каналов на участках волоконно-оптической сети связи ...	23
5 Выбор технологии и оборудования передачи данных	29
5.1 Обзор технологий передачи данных.....	29
5.2 Обзор оборудования передачи данных.....	38
6 Выбор типа волоконно-оптического кабеля	47
6.1 Кабели для подвески на опорах.....	47
6.2 Кабели для прокладки непосредственно в грунт.....	50
6.3 Типы оптических волокон.....	52
7 Расчет параметров волоконно-оптических линий связи	60
7.1 Расчет длины усилительного участка.....	60
7.2 Расчет длины регенерационного участка.....	61
7.3 Расчет хроматической дисперсии оптического волокна.....	65
8 Расстановка усилительных пунктов	68
9 Организация связи на железной дороге	70
10 Расчет надежности волоконно-оптических систем передачи	77
10.1 Надежность магистральной первичной сети.....	80
10.2 Надежность дорожной первичной сети.....	81
10.3 Надежность отделенческой первичной сети.....	82
11 Организация технической эксплуатации волоконно-оптической линии связи	83
11.1 Ремонт оптических линий связи.....	87
11.2 Аварийно-восстановительные работы.....	89
12 Проблемы экономической эффективности волоконно-оптической связи	90
13 Охрана труда при технической эксплуатации волоконно-оптических систем передачи	92
Заключение	94
Список рекомендуемой литературы	95
Приложение А План пояснительной записки курсового проекта	97
Приложение Б Исходные данные для выполнения курсового проекта	98

ВВЕДЕНИЕ

Средства связи на железнодорожном транспорте широко используются для планирования и управления процессами перевозки грузов и пассажиров, обеспечения их безопасности и хозяйственных нужд структурных подразделений железной дороги. Их развитие связано, прежде всего, с интенсивностью перевозок и обеспечением необходимого уровня безопасности движения. Для эффективного решения этих задач на железных дорогах большое значение имеют современные цифровые системы передачи информации и волоконно-оптические сети связи. Такие сети связи уже широко используются в транспортных комплексах за рубежом. К наиболее значимым из них относятся сети связи Российских железных дорог (ОАО «ТрансТелеКом»), Единых энергосистем России (РАО ЕЭС России), ОАО «Газпром», ОАО «Связьтранснефть» и др. На Белорусской железной дороге (БЖД) также происходит внедрение волоконно-оптических систем передачи. Для управления перевозочным процессом и обеспечения безопасности перевозки грузов и пассажиров БЖД оснащена совершенными системами железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (ЖАТС). Для организации работы и взаимодействия этих систем применяются кабельные линии автоматики, телемеханики и связи (КЛС) и воздушные высоковольтные линии автоблокировки.

По КЛС организуются первичные сети каналов и узлов связи, а по ним – вторичные сети каналов различных видов связи и телемеханики (телефонная, телеграфная, передача данных, телеуправления, телесигнализации, телеизмерения и др.).

До последнего времени на КЛС применялись исключительно электрические кабели с металлическими (медными) токопроводящими жилами. В настоящее время происходит переход к волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) и цифровым волоконно-оптическим линиям передачи (ВОЛП). Технические возможности

ВОЛП уникальны: они созданы с использованием новейших телекоммуникационных технологий синхронной цифровой иерархии (SDH/СЦИ) и волнового уплотнения WDM (DWDM).

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) идеально подходят для железнодорожного транспорта, особенно с появлением качественных оптических кабелей. Они обладают следующими преимуществами:

- большая полоса пропускания (позволяет организовать необходимое число каналов);

- отсутствие мешающего влияния сигнальных цепей автоматики и телемеханики и высоковольтных тяговых цепей на электрифицированных участках (позволяет прокладывать кабель в непосредственной близости от этих цепей);

- независимость от используемой аппаратуры передачи (при смене аппаратуры нет необходимости менять линейную часть тракта);

- возможность подвески кабеля на опорах линий электропередачи (ЛЭП), что позволяет значительно снизить затраты на прокладку кабеля;

- стойкость против коррозии (допускает использование в агрессивных средах);

- сопоставимая с медным кабелем цена;

- отсутствие дорогих металлов (повышает «вандалостойкость» магистрали).

На основе ВОЛП на железных дорогах создаются дорожные и отделенческие цифровые сети связи, по которым осуществляется планирование и оперативное руководство работой железной дороги и ее хозяйственных подразделений. Непрерывно развиваются также сети автоматизированной цифровой общеслужебной телефонной связи (ОбТС), внедряются новые системы железнодорожной автоматики и телемеханики (автоблокировки, электрической и диспетчерской централизаций, автоматической локомотивной сигнализации и др.), обеспечивающих безопасность движения грузовых и пассажирских поездов.

Основная цель проектирования сети связи железной дороги – выбрать наиболее рациональную архитектуру и технологии передачи информации для планирования и управления перевозочным процес-

сом Белорусской железной дороги и организации логистики дороги, т. е. рационального процесса продвижения грузов и товаров и оказания услуг поставщикам и потребителям грузов. При этом сеть связи должна удовлетворять требованиям пользователей как в настоящее время, так и в будущем. Кроме того, архитектура сети должна быть «неуязвимой для будущего». Это означает, что сеть должна быть гибкой, масштабируемой и модульной и обеспечить в будущем требуемый рост емкости и пропускной способности сети без привлечения крупных капиталовложений. В сети должны использоваться стандартные международные интерфейсы, обеспечивая надежное и устойчивое функционирование сети, высокое качество обслуживания пользователей и обеспечивать взаимодействие с общегосударственной сетью связи.

Для электропитания оборудования сети связи дороги предполагается использовать существующую сеть электроснабжения системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

Верхний уровень в архитектуре топологии сети представлен цифровой первичной транспортной сетью. Для его реализации используется волоконно-оптический кабель (ВОК) и оборудование синхронной цифровой иерархии. Нижний уровень будет обеспечиваться цифровыми АТС.

Требования к проектированию волоконно-оптической сети связи железной дороги. Проект – это комплексный технико-экономический документ, в котором техническая и экономическая стороны строительства неразрывно связаны. Проектные решения разрабатываются с учетом новейших достижений науки и техники с тем, чтобы строящаяся линия ко времени ее ввода в эксплуатацию была технически передовой и имела высокие технико-экономические показатели.

В курсовом проекте по дисциплинам «Многоканальные системы передачи информации» и «Цифровые телекоммуникационные сети» решаются задачи организации волоконно-оптической сети связи на железной дороге, выбора волоконно-оптического кабеля и системы передачи информации, расчет параметров передачи и др.

В дипломном проекте задачи организации волоконно-оптической сети связи на железной дороге решаются комплексно, т. е. наряду с проектированием сети связи и др., в проекте рассматриваются также

вопросы выбора трассы, строительства линии, надежности и устойчивости сети, технико-экономические обоснования принимаемых решений, охраны труда и др.

Курсовой и дипломный проекты выполняются по индивидуальным заданиям и оформляются в виде пояснительной записки и чертежей. Пояснительная записка должна отражать конкретные решения того или иного варианта решения проблемы (выбор трассы, выбор кабеля, способ прокладки кабеля, выбор системы передачи и др.). Выбор конкретных решений следует обосновывать технико-экономическими расчетами.

При разработке проектов студенты обязаны руководствоваться правилами выполнения и оформления схем, условными графическими обозначениями применяемых в схемах элементов, правилами оформления пояснительной записки, которые регламентируются государственными и международными стандартами.

Текстовый материал следует излагать конкретно и четко. В пояснительную записку не разрешается включать материалы из учебников, технических описаний, норм проектирования и др.

Пояснительная записка должна быть иллюстрирована необходимыми схемами, чертежами, рисунками, поясняющими выбор тех или иных принятых в проекте решений. При этом обязательны ссылки на использованную литературу, из которой заимствованы выбранные решения, данные и др.

При выполнении расчетов в пояснительной записке должна быть приведена в общем виде расчетная формула с расшифровкой всех входящих в нее буквенных обозначений и ссылкой на литературу, из которой взята эта расчетная формула или входящие в нее исходные данные. Для одной исходной величины или частоты расчет следует привести подробно, а при других частотах или исходных данных результаты расчета заносятся лишь в таблицы. Результаты расчета оформляются в виде таблиц и графиков и сопровождаются выводами и анализом полученных результатов.

Основными литературными источниками при выполнении курсовых и дипломных проектов являются учебники [1, 2] и учебно-методическое пособие [3], а также статьи в научно-технических и производственно-технических отечественных и иностранных журналах.

1 БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА И ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Транспортный комплекс Республики Беларусь является важной составляющей ее социально-экономической инфраструктуры. В его состав входят автомобильный, железнодорожный, воздушный и водный, а также трубопроводный виды транспорта.

Взаимодействие различных видов транспорта Республики Беларусь заключается в слаженной и согласованной их работе в общем перевозочном процессе на основе единой транспортной системы (ЕТС). ЕТС как межотраслевая система – это принципиально новое образование, обслуживающая и реализующая связи всех отраслей производства и всех слоев населения на всех уровнях управления страной.

В рыночных условиях важным требованием ЕТС является своевременная и качественная доставка грузов и пассажиров. Кроме того, наша страна находится на пересечении целого ряда торговых путей, что даёт возможность получения дохода от перевозок транзитных грузов. Выполнить стоящие перед транспортом задачи возможно с применением логистики – управляющего процесса, который с помощью различных экономико-математических методов позволяет оптимизировать работу отдельных элементов перевозочного процесса и объединить эти элементы в единую систему, планировать, контролировать и регулировать движение материальных потоков, обеспечивать минимальные сроки и минимальные затраты по доставке товаров потребителям, выбирать рациональный вид транспорта.

Многообразие задач, стоящих перед транспортной отраслью, определены постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1249 от 29 августа 2008 г., а также утверждена Программа развития логистической системы на период до 2015 г. В соответствии с этой программой планируется построить или создать путем модернизации существующей инфраструктуры 19 транспортно-логистических центров (ТЛЦ) общего пользования. С учетом внешнеторговых и транзитных грузопотоков и прохождения через территорию Беларуси международных транспортных коридоров такие центры предполагается создать в областных центрах и городах Жлобине, Мозыре, Пинске, Барановичах, Орше, Лиде, Борисове, Бобруйске.

ТЛЦ помогут решить проблему комплексного развития всех видов транспорта.

Республика Беларусь является естественным мостом между Российской Федерацией (РФ) и Западной Европой, что позволило БЖД занять достойное место в системе международной экономической интеграции, стать надежным партнером ведущих европейских держав в обеспечении и развитии эффективных транспортных связей на Европейском континенте.

По территории Беларуси проходят второй и девятый общеевропейские транспортные коридоры, и это определяет важность транзитных перевозок для нашей страны.

Белорусская железная дорога находится в пределах Республики Беларусь. Республика Беларусь граничит с Российской Федерацией, Украиной, Польшей, Латвией, Литвой и является транзитным государством (рисунок 1.1). Обладая высокой провозной и пропускной способностью, БЖД занимает ведущее место в транспортной системе республики.

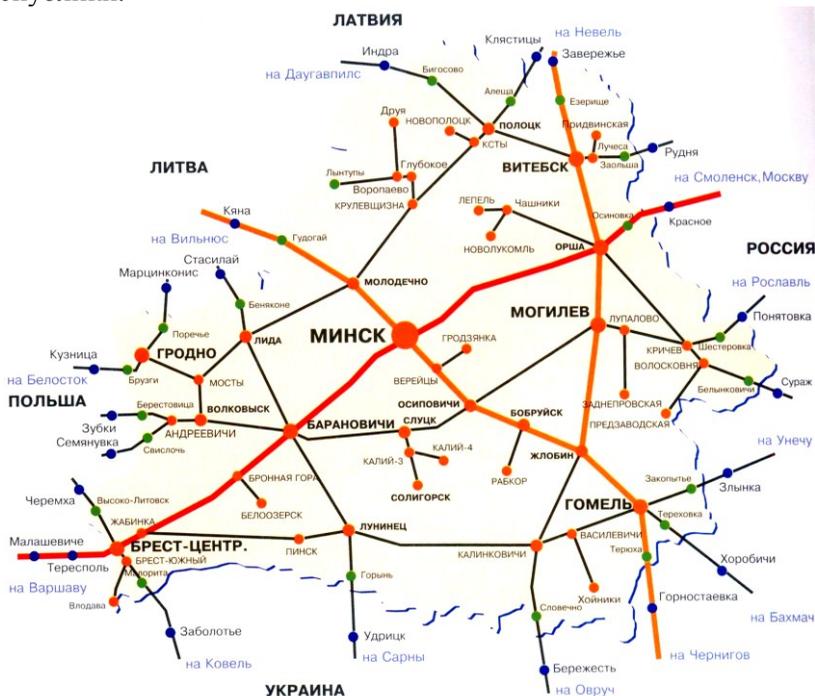


Рисунок 1.1 – Транспортная сеть Белорусской железной дороги

В состав БЖД входят управление дороги (г. Минск) и следующие отделения (унитарные предприятия): Минское (НОД-1), Барановичское (НОД-2), Брестское (НОД-4), Гомельское (НОД-3), Могилёвское (НОД-5), Витебское (НОД-6), объединяющие 384 крупные и малые станции. Дорога граничит с Октябрьской и Московской железными дорогами России, Юго-Западной и Львовской железными дорогами Украины, с железными дорогами Прибалтики и Польши.

Крупные узловые станции БЖД Минск, Молодечно, Орша, Барановичи, Гродно, Волковыск, Лида, Лунинец, Брест, Гомель, Жлобин, Калинковичи, Могилёв, Осиповичи, Кричев, Витебск, Полоцк работают на 4–6 направлениях (рисунок 1.2). Белорусская железная дорога активно сотрудничает с железными дорогами России, Польши, Германии, Литвы в организации транзитных грузовых и пассажирских перевозок.

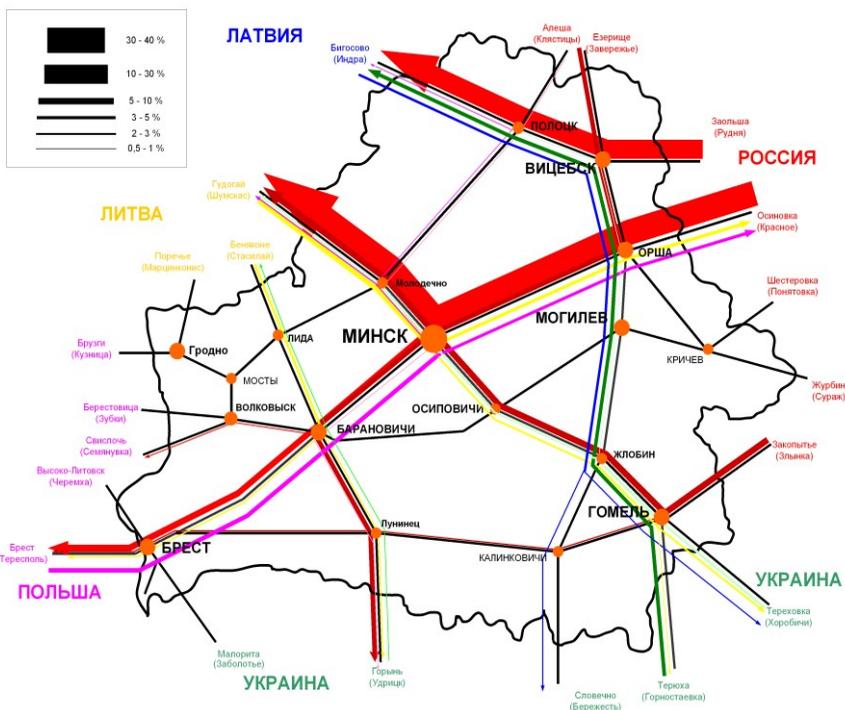


Рисунок 1.2 – Схема направлений транзитных грузопотоков БЖД

Белорусская железная дорога является одной из ведущих отраслей экономики Республики Беларусь. Среди других транспортных предприятий страны железная дорога обеспечивает 94 % грузопотока и 60 % пассажиропотока. Дорогой выполняются значительные перевозки пассажиров в международном сообщении.

Оснащенность дороги СЖАТ, связи и вычислительной техники является одним из решающих показателей технического состояния железной дороги, информационное обеспечения перевозки грузов и пассажиров.

Для обеспечения всего комплекса транспортных услуг дорога располагает на пограничных переходах необходимыми обустройствами, способными переработать всю номенклатуру перевозимых грузов. Средства СЖАТ и связи обеспечивают внедрение современных информационных технологий и позволяют увеличить пропускную способность железнодорожных линий, перерабатывающую способность станций, улучшить условия труда железнодорожников и обеспечить высокий уровень безопасности движения поездов.

2 ВЫБОР ТОПОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ

Топология сети связи в основном зависит от топологии железной дороги. При этом важнейшие характеристики сети связи определяются связностью узлов, надежностью, устойчивостью и пропускной способностью сети. Топология сети основывается на разумном компромиссе между надежностью и устойчивостью сети, ее стоимостью и простотой технического обслуживания.

При проектировании сети связи для железной дороги приоритетными являются показатели надежности и устойчивости, которые связаны со способностью восстановления после отказов в сети, включая отказы линий связи, узлов и оконечных устройств. Топология сети должна обеспечивать локализацию неисправностей, возможность отключения отказавшего оборудования, введение обходных маршрутов и изменение конфигурации сети.

Простота технического обслуживания сети определяется тем, насколько выбранная топология позволяет упростить диагностирование, локализацию и устранение неисправностей.

Стоимость сети во многом зависит от числа и сложности узлов и линий связи. Выбранная топология сети должна, по возможности,

обеспечивать оптимальное соединение узлов линиями связи так, чтобы общая стоимость передающего и приемного оборудования, а также программного обеспечения была минимальной.

Линейной топологией, или схемой «точка-точка», принято называть схему, связывающую два узла сети (оконечные станции), на каждом из которых формируются и заканчиваются все информационные потоки между узлами. Для передачи потоков посредством ВОСП используются два волокна (по одному в каждом направлении передачи), а при резервировании волокон – четыре волокна (резерв 1+1 или 1:1) (рисунок 2.1, а). Такая топология является наиболее простой и используется при передаче больших цифровых потоков по высокоскоростным каналам связи.

Развитием линейной топологии при последовательном соединении узлов сети (или нескольких пунктов выделения каналов) является цепная топология с возможностью многократного ввода-вывода потоков в узлах сети (пунктах выделения каналов) одного общего для всех пунктов выделения канала (схема «точка-многоточка») или разных каналов из единого цифрового потока, рисунок 2.1, б.

Звездная топология сети характеризуется тем, что каждый узел сети (пункт выделения каналов) имеет двухстороннюю связь по отдельной линии с центральным узлом – концентратором (обладающим функциями мультиплексора ввода – вывода и системы кроссовой коммутации), благодаря которому и обеспечивается полная физическая связность сети (рисунок 2.1, в). Необходимо отметить, что при общем стандартном наборе функций оборудования SDH/СЦИ, определяемом рекомендациями МСЭ, мультиплексоры, выпускаемые конкретными производителями оборудования, могут не иметь полный набор перечисленных возможностей, либо, наоборот, иметь дополнительные.

Наиболее характерной топологией для сетей SDH/СЦИ является кольцевая. Она характеризуется тем, что узлы сети (пункты выделения каналов) связаны линейно, но последний из них соединен с первым, образуя замкнутую петлю (кольцо). В кольце возможна организация одно- и двунаправленной передачи цифрового потока между узлами сети. Основное преимущество этой топологии состоит в легкости организации защиты благодаря двум оптическим входам в мультиплексорах, позволяющих создать двойное кольцо со встречными цифровыми потоками.

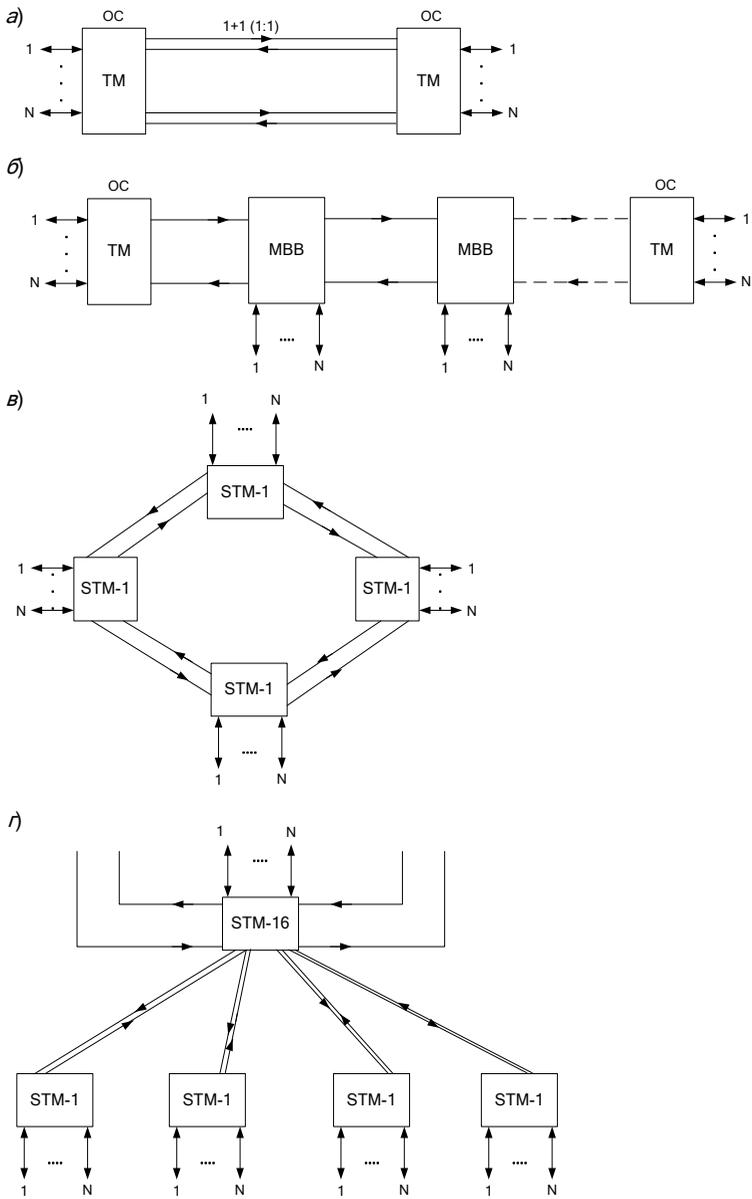


Рисунок 2.1 – Типы базовых топологий цифровых сетей

Система защиты организуется двумя способами. Первый позволяет переключать «основное» кольцо на «резервное». В этом варианте блочные виртуальные контейнеры имеют доступ только к основному кольцу. В случае обрыва ВОК происходит замыкание основного и резервного колец на границах поврежденного участка. При этом приемник передатчик выходного блока мультиплексора соединяется с той его стороной, где произошел обрыв кабеля. Это приводит к образованию нового кольца. Второй способ состоит в том, что блочные виртуальные контейнеры передаются одновременно в двух противоположных направлениях по разным кольцам. Если происходит сбой в одном из колец, система управления автоматически выбирает тот же блок из другого кольца. Программы управления мультиплексорами поддерживают либо один из двух, либо оба способа защиты.

Кольцо, организованное оптическими волокнами внутри одного ВОК, называется «плоским». При использовании волокон кабелей, проложенных по разным трассам между узлами сети (пунктами выделения каналов) и двунаправленной передачи цифрового потока, кольцо является «выпуклым» (рисунок 2.1, в).

Наибольшей надежностью обладает кольцевая топология сети с организацией выпуклых колец между узлами и двунаправленной передачей цифрового потока внутри кольца. Очевидно, что наибольшая надежность кольцевых структур достигается тогда, когда кабельные трассы кольца территориально разнесены. В зависимости от назначения ВОЛС можно организовать кольцевые структуры для магистральной и дорожной связи по параллельным железнодорожным направлениям. Если это невозможно, для повышения надежности ВОЛС можно замкнуть кабельное кольцо путем прокладки (подвески) кабеля по разные стороны железной дороги или организовать параллельный радиорелейный тракт SDH/СЦИ. На практике находят применение топология «плоского кольца», когда для замыкания кольца используются оптические волокна внутри одного кабеля.

Сочетания рассмотренных топологий позволяет создавать сети СЦИ с различной архитектурой. Как правило, все мультиплексоры СЦИ имеют возможность оснащения различными платами оптоэлектронных интерфейсов на длинах волн 1310 и 1550 нм, выбор которых позволяет оптимизировать структуру линии в зависимости от соотношения стоимости и длин регенерационных участков.

При выборе топологии сетей необходимо также учитывать число оконечных устройств (ОУ) и устройств обработки информации (УОИ); территориальное расположение ОУ и УОИ; функциональное назначение и показатели качества, надежности, стоимости сооружения сети; условия эксплуатации сети, требования к массе и габаритным размерам ее элементов.

Для железнодорожных SDH/СЦИ сетей наиболее целесообразно использовать кольцевые топологии и их варианты, при этом важным является не только правильный выбор оборудования, но и оптимальное расположение узлов в каждом кольце и узлов, где будет организовано их взаимодействие. При этом должны быть обеспечены условия построения системы управления сети с кольцевыми структурами.

Кольцевание сети должно будет осуществляться исходя из следующих принципов. В случае, когда железные дороги проходят параллельно, кольцевание осуществляется с использованием поперечных направлений или инфраструктуры других ведомственных сетей, например, на опорах линий электропередачи (ЛЭП). На линейной сети связи, проложенной вдоль дороги, будут формироваться плоские кольца. Учитывая взаимное тяготение узлов, расположенных вдоль железнодорожных магистралей, плоские кольца целесообразно организовывать в пределах диспетчерского участка и отделения железной дороги. Выпуклые кольца большой протяженности организуются на дорожном и магистральном уровнях.

Большое значение для волоконно-оптических сетей связи имеет способ физического доступа к передающей среде – волокну, тип сетевого интерфейса. По этому признаку волоконно-оптические сети связи разделяются на пассивные и активные.

В пассивных топологиях физический доступ (ввод-вывод сигнала) осуществляется в оптической области (по оптическому сигналу) с помощью пассивных оптических элементов, таких, как оптические ответвители, разветвители, спектральные мультиплексоры-демультиплексоры, переключатели. Узел сети получает в этом случае порцию оптической энергии непосредственно из оптического волокна и вводит оптический сигнал непосредственно в оптическое волокно. Пассивный узел – это простая точка ветвления, которая может только ослабить сигнал, но не изменяет его форму и содержание. Непрерывность оптической среды в точках доступа пассивной сети не нарушается, однако возникающие при вводе-выводе потери сиг-

нала требуют тщательного расчета его энергетического потенциала в сети. С точки зрения топологии в пассивных волоконно-оптических сетях связи используется так называемая многоточечная пассивная схема той или иной конфигурации с оптико-оптическим сетевым интерфейсом.

В активных топологиях доступ к общему цифровому потоку осуществляется в электрической области, для чего оптический сигнал в узле преобразуется в электрический при выводе, а при вводе выполняется обратное преобразование. В узлах (пунктах выделения каналов) сети нарушается непрерывность передающей среды: сетевой интерфейс при выводе оптоэлектронный, а при вводе – электронно-оптический. Активный узел может изменять или переключать цифровые потоки (каналы) и в этом отношении имеет больше функциональных возможностей по обработке сигнала, чем пассивный узел, однако при этом возрастает и вероятность искажения сигнала.

3 СТРУКТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ И РАСЧЕТ КАНАЛОВ НА ЕЕ УЧАСТКАХ

Волоконно-оптические сети связи в общем случае являются двухуровневыми и состоят из транспортной или магистральной сети и сетей абонентского доступа.

В транспортной сети циркулируют крупные цифровые потоки с максимально высокой скоростью передачи между узлами, в которых осуществляется доступ к этим потокам, их разделение на более мелкие цифровые потоки и распределение последних в сети абонентского доступа. Понятие сети абонентского доступа связано с тем, какой цифровой поток требуется абоненту или группе абонентов: 64 кбит/с ($n \times 64$ кбит/с, где n – количество потоков), 2 Мбит/с (или $n \times 2$ Мбит/с), 34, 155 или 622 Мбит/с.

Особенностью существующей железнодорожной первичной сети связи является ее иерархическая структура, отражающая структуру управления технологическими процессами на дорожном, отделенческом и местном (включая внутриобъектовый) уровнях (рисунок 3.1).

Дорожная сеть включает в себя дорожный (ДУ) и отделенческие (ОУ) узлы связи и соединяющие их линии передачи. По каналам и трактам дорожной первичной сети осуществляется передача информации между управлением железной дороги и ее отделениями, а также между самими отделениями железной дороги.

Отделенческая сеть связи имеет ряд специфических особенностей в построении ее первичной и вторичных сетей, которые заставляют считать целесообразным выделение отделенческих связей в отдельный уровень иерархии сети.

Отделенческая сеть включает в себя отделенческий узел связи (ОУ), узлы связи участковых (УС), промежуточных (ПС) и оконечных (ОС) станций и линии передачи, их соединяющие. По каналам отделенческой сети осуществляется передача информации между отделением железной дороги и станциями, а также между железнодорожными станциями. Местная сеть связи организуется в пределах крупных железнодорожных узлов и станций, чтобы обеспечить потребности в каналах для оперативного руководства эксплуатационной работой. Она включает в себя местные узлы, оконечные станции, соединительные и абонентские линии передачи.

Структура создаваемых волоконно-оптических сетей, сохраняя иерархическую преемственность, позволяет более гибко и эффективно решить задачи обмена информации между различными категориями пользователей железнодорожного транспорта благодаря применению ВОСП SDH/СЦИ, встроенной в нее системы управления оборудованием сети, созданию кольцевых топологий.

На рисунке 3.2 приведен пример структуры сети, построенной на базе оборудования SDH/СЦИ. Вдоль железной дороги прокладываются ВОЛС с использованием систем передачи STM-4 (STM-16) для организации дорожной связи.

На крупных и средних станциях должны быть организованы сетевые узлы, оборудованные МВВ с функциями кроссовой коммутации и обеспечивающие ответвление высокоскоростных потоков, распределение потоков, взаимодействие с системами STM-1, STM-4, STM-16 нижнего уровня и разветвление потоков 2 Мбит/с по направлениям на узловых железнодорожных станциях, а также выделение необходимого количества потоков 2,048 Мбит/с.

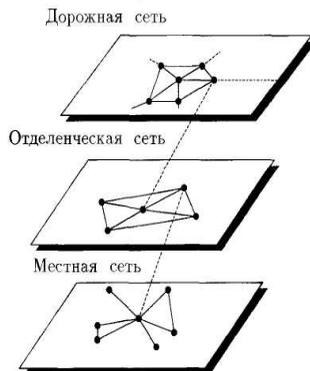


Рисунок 3.1 – Иерархическая структура первичной сети связи железной дороги

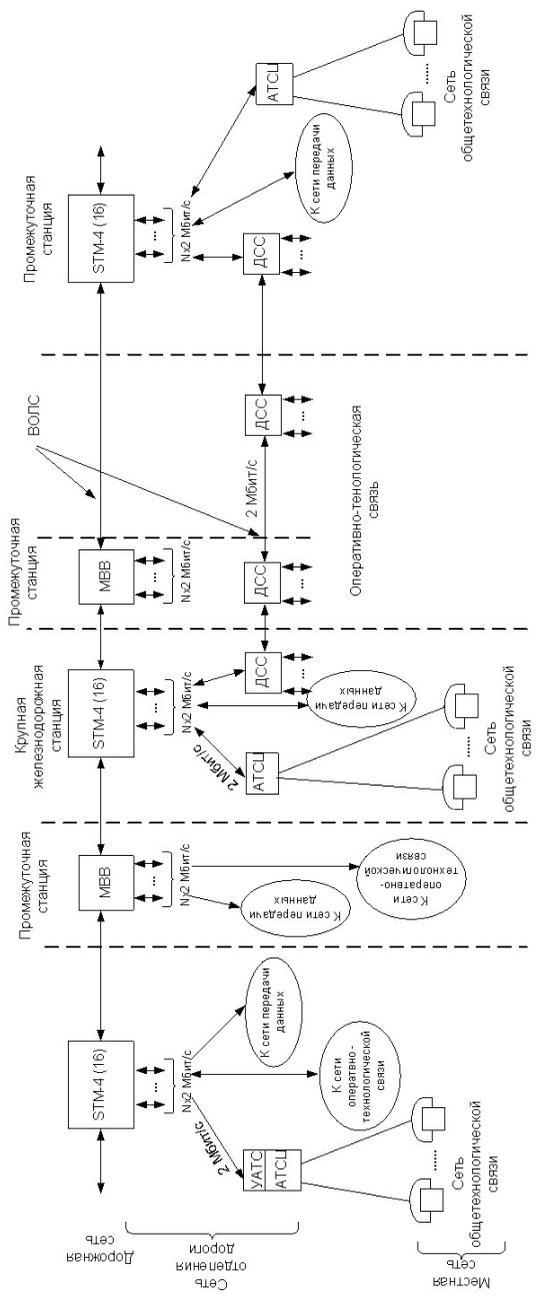


Рисунок 3.2 – Пример структурной схемы железнодорожной волоконно-оптической сети связи

Терминалы абонентов местной сети включаются в коммутационное оборудование вторичных сетей, которое в свою очередь через стыки 2,048 Мбит/с подключается к первичной сети SDH/СЦИ. Для подтягивания абонентов малых станций используются отдельные тракты, рассчитанные на скорость 2,048 Мбит/с, которые могут быть организованы по волокнам того же кабеля или по парам существующих симметричных кабелей. Для организации оперативно-технологической связи используется специализированная аппаратура типа ДСС, которая работает по оптическим волокнам.

Сеть связи железнодорожного транспорта представляет собой совокупность первичной и вторичных сетей. Вторичные сети связи железнодорожного транспорта предназначены для организации процессов управления движением поездов, осуществления эксплуатационной и коммерческой работы структурных подразделений. В зависимости от назначения, вида передаваемой информации и воздействия на управление процессом перевозок организуются вторичные сети оперативно-технологической связи (ОТС), общетехнологической сети связи (ОбТС) и сети передачи данных (СПД) (см. рисунок 3.2). Они служат для удовлетворения потребностей подразделений железнодорожного транспорта в передаче различного вида сообщений. информации.

Для расчета количества каналов первичной сети связи необходимо построить общую схему сети связи железной дороги, дорожной и отделенческой сетей связи (рисунки 3.3–3.5).

Часть каналов относится к отделенческому уровню: от каждого отделения дороги к каждой станции этого отделения (k_1), а часть – к дорожному уровню: между соседними отделениями дороги (k_2) и между дорожным узлом и каждым отделенческим узлом (k_3). Согласно этому строятся структурные схемы с соответствующим количеством каналов на дорожном и отделенческом уровнях (рисунки 3.6 и 3.7).

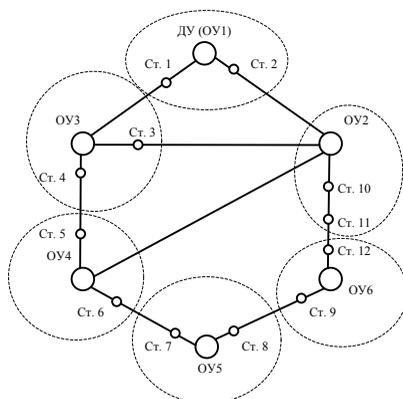


Рисунок 3.3 – Стилизованная схема железной дороги

При проектировании магистрали связи используются следующие каналы связи:

- СПД (Е1) – каналы систем передачи данных;
- ОТС (Е0) – каналы оперативно-технической связи;
- ОБТС (Е0) – каналы телефонной сети общего пользования.

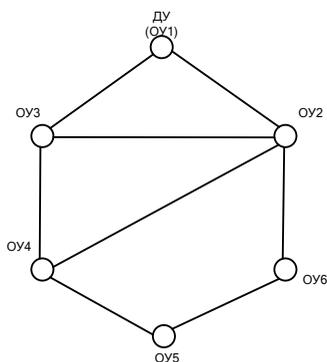


Рисунок 3.4 – Стилизованная схема дорожной сети связи

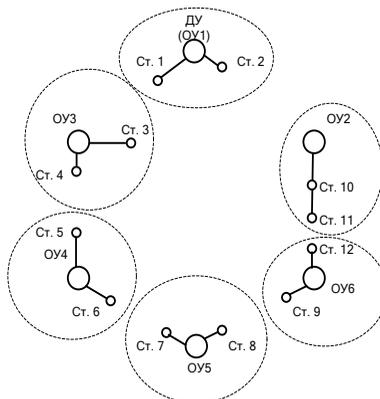


Рисунок 3.5 – Стилизованная схема отделенческой сети связи

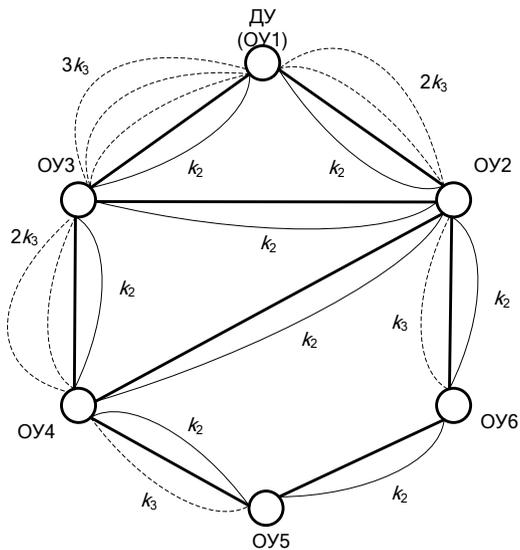


Рисунок 3.6 – Количество каналов между станциями на дорожном уровне

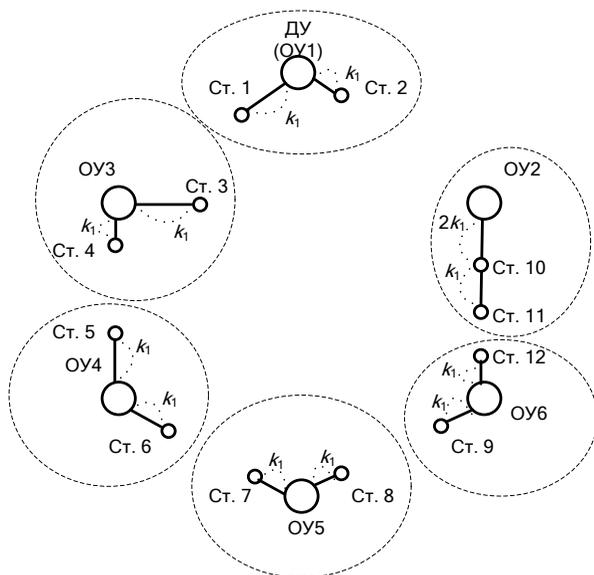


Рисунок 3.7 – Количество каналов между станциями на отделенческом уровне

Далее составляется сводная таблица с необходимым количеством каналов на всех участках железной дороги (таблица 3.1). Вначале необходимо определить количество каналов для каждого из видов связи:

$$k_1 = aK_1 E1 (\text{СПД}) + bK_1 E0 (\text{ОТС}) + cK_1 E0 (\text{ОбТС});$$

$$k_2 = aK_2 E1 (\text{СПД}) + bK_2 E0 (\text{ОТС}) + cK_2 E0 (\text{ОбТС});$$

$$k_3 = aK_3 E1 (\text{СПД}) + bK_3 E0 (\text{ОТС}) + cK_3 E0 (\text{ОбТС}),$$

где k_1 – суммарное количество каналов отделенческой сети (между станциями и отделением дороги) для всех вторичных сетей связи (СПД, ОТС, ОбТС);

k_2 – суммарное количество каналов дорожной сети (между соседними отделениями дороги) для всех вторичных сетей связи (СПД, ОТС, ОбТС);

k_3 – суммарное количество каналов дорожной сети (между дорожным узлом и отделениями дороги) для всех вторичных сетей связи (СПД, ОТС, ОбТС);

a, b, c – коэффициенты доли каналов отдельных вторичных сетей в общем количестве каналов.

Для примера примем следующие значения: $K_1 = 100$; $K_2 = 500$; $K_3 = 1000$; $a = b = c = 1$.

Тогда

$$k_1 = 100 \text{ Е1 (СПД)} + 100 \text{ Е0 (ОТС)} + 100 \text{ Е0 (ОбТС)};$$

$$k_2 = 500 \text{ Е1 (СПД)} + 500 \text{ Е0 (ОТС)} + 500 \text{ Е0 (ОбТС)};$$

$$k_3 = 1000 \text{ Е1 (СПД)} + 1000 \text{ Е0 (ОТС)} + 1000 \text{ Е0 (ОбТС)}.$$

Пересчет из Е0 в Е1 и из Е1 в STM-1 производится следующим образом: $E1 = 30 \text{ Е0}$; $STM-1 = 63 \text{ Е1}$.

Таблица 3.1 – Количество каналов на каждом из участков железной дороги

Участок	Каналы	Суммарное количество каналов СПД, ОТС и ОбТС	Количество Е1	Количество STM-1
ДУ (ОУ1) – ОУ3	$k_2 + 3k_3$	3500Е1 + 7000Е0	3774	60
ДУ (ОУ1) – ОУ2	$k_2 + 2k_3$	2500Е1 + 5000Е0	2667	43
ОУ3 – ОУ4				
ОУ2 – ОУ6	$k_2 + k_3$	1500Е1 + 3000Е0	1600	26
ОУ4 – ОУ5				
ОУ2 – ОУ3	k_2	500Е1 + 1000Е0	534	9
ОУ5 – ОУ6				
ОУ2 – Ст.10	$2k_1$	200Е1 + 400Е0	214	4
ДУ(ОУ1) – Ст.1	k_1	100Е1 + 200Е0	107	2
ДУ(ОУ1) – Ст.2				
ОУ3 – Ст.3				
ОУ3 – Ст.4				
ОУ4 – Ст.5				
ОУ4 – Ст.6				
ОУ5 – Ст.7				
ОУ5 – Ст.8				
ОУ6 – Ст.9				
Ст.10 – Ст.11				
ОУ6 – Ст.12				

4 РЕЗЕРВИРОВАНИЕ КАНАЛОВ НА УЧАСТКАХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ

При проектировании сети связи железной дороги приоритетными являются показатели надежности и устойчивости, которые связаны со способностью восстановления после отказов в сети, включая отказы линий связи, узлов и оконечных устройств.

Самовосстанавливающимися называются сети, имеющие такую организацию, при которой достигается не только высокая надежность функционирования сети, обусловленная использованием ВОК, но и возможность сохранения или восстановления (за очень короткое время в десятки миллисекунд) ее работоспособности даже в случае отказа одного из ее элементов или среды передачи – кабеля.

В принципе существуют различные методы обеспечения быстрого восстановления работоспособности синхронных сетей, которые могут быть сведены к следующим схемам:

- 1) резервирование участков сети по схемам 1+1 и 1:1 по разнесенным трассам;
- 2) организация самовосстанавливающихся плоских кольцевых сетей, резервированных по схемам 1+1 и 1:1;
- 3) резервирование терминального оборудования по схемам 1:1 и N:1;
- 4) восстановление работоспособности сети путем обхода неработоспособного узла;
- 5) использование систем оперативного переключения.

Указанные методы могут использоваться как отдельно, так и в комбинации.

В первом случае участки между двумя узлами сети соединяются по двум разнесенным трассам, сигналы по которым распространяются одновременно. В узле приема они могут обрабатываться по двум схемам:

- резервирование по схеме 1+1 – сигналы анализируются и выбирается тот, который имеет наилучшее соотношение параметров;
- резервирование по схеме 1:1 – альтернативным маршрутам назначаются приоритеты – низкий и высокий, ветвь с низким приоритетом находится в режиме горячего резерва, переключение на нее происходит по аварийному сигналу от системы управления.

Это общие методы восстановления работоспособности, применимые для любых сетей.

Во втором случае используется топология типа "плоское кольцо", которое может быть организовано с помощью двух оптических волокон в одном ВОК.

Защита маршрута в плоском кольце, которая соответствует типу 1+1, может быть организована двумя путями.

Первый путь – используется защита на уровне трибных блоков TU-*n*, передаваемых по разным кольцам (основному и резервному). Весь основной трафик передается в одном из направлений (например, по часовой стрелке). Если в момент приема мультиплексором блока, посланного другими мультиплексорами, происходит сбой в одном из колец, система управления, осуществляющая постоянный мониторинг колец, автоматически выбирает такой же блок из другого кольца. Эта защита носит распределенный по кольцу характер, а сам метод носит название метода организации однонаправленного сдвоенного кольца.

Второй путь – защита маршрута может быть организована так, что сигнал передается в двух противоположных направлениях (восточном и западном), причем одно направление используется как основное, второе – как резервное. При таком методе в случае сбоя происходит переключение с основного кольца на резервное и называется методом организации двунаправленного сдвоенного кольца. В этом случае блоки TU-*n* исходно имеют доступ только к основному кольцу. В случае сбоя происходит замыкание основного и защитного колец на границах дефектного участка, образующее новое кольцо. Это замыкание происходит обычно за счет включения петли обратной связи, замыкающей приемник и передатчик агрегатного блока на соответствующей стороне мультиплексора (восточной или западной). Современные схемы управления мультиплексорами могут поддерживать оба эти метода защиты.

В третьем случае восстановление работоспособности осуществляется за счет резервирования на уровне трибных интерфейсов. Схема резервирования в общем случае $M:1$, что допускает различную степень резервирования: от 1:1 (100 %) до, например, 4:1 (25 %), когда на 4 основных трибных интерфейсных карты используется одна резервная, которая автоматически выбирается системой кросс-ком-

мутации при отказе одной из основных. Этот метод широко (если не повсеместно) распространен в аппаратуре SDH/СЦИ для резервирования трибных карт 2 Мбит/с (4:1 или 3:1 для STM-1 либо 16:1, 12:1, 8:1 для STM-4), а также резервирования наиболее важных сменных блоков, например, блоков кросс-коммутации и систем управления и резервного питания, время переключения которых на запасные не превышает обычно 10 мс.

В четвертом случае резервирование как таковое не используется, а работоспособность системы в целом (на уровне агрегатных блоков) восстанавливается за счет исключения поврежденного узла из схемы функционирования. Так, системы управления SDH/СЦИ мультиплексоров обычно дают возможность организовывать обходной путь, позволяющий пропускать поток агрегатных блоков мимо мультиплексора в случае его отказа.

В пятом случае, характерном для сетей общего вида или ячеистых сетей, в узлах сети устанавливаются кросс-коммутаторы систем оперативного переключения, которые осуществляют, в случае отказа, вызванного либо разрывом соединительного кабеля, либо отказом узла последовательной линейной цепи, реконфигурацию прилегающих (входящих или исходящих) участков сети и соответствующую кросс-коммутацию потоков. Процедура такой реконфигурации может быть централизованной или распределенной. В первом случае она осуществляется сетевым центром управления, что может быть реализовано достаточно просто, во втором совместное решение о реконфигурации должно вырабатываться группой прилегающих систем оперативного переключения. Могут применяться и комбинированные методы.

Использование систем оперативного переключения по принципу организации защиты напоминает схему резервирования 1:1 по разнесенным трассам. Разница, однако, состоит в том, что в последнем случае физический или виртуальный канал уже существует, тогда как в первом он формируется в момент оперативного переключения (действие, более характерное для коммутатора/маршрутизатора в сетях пакетной коммутации).

Для повышения надежности функционирования дорожной сети используют резервирование по схеме 1+1 или 1:1 по разнесенным трассам, которые формируются в процессе использовании кольцевой

топологии данной сети (см. рисунок 4.1), и аналогичное резервирование терминального оборудования.

Для определения количества каналов дорожной сети выбирается первое кольцо, количество каналов во всех участках которого устанавливаются равное сумме количества каналов всех участков кольца (рисунок 4.1). Если на нескольких участках одного кольца передается один и тот же поток, то повторно этот поток учитывать не надо. В примере на рисунке 4.1 таких потоков нет, но если бы отсутствовал участок ОУ2 – ОУ3, то один и тот же двойной поток k_3 ($2k_3$) присутствовал бы на участках ОУ1 – ОУ3 и ОУ3 – ОУ4 (рисунок 4.2).

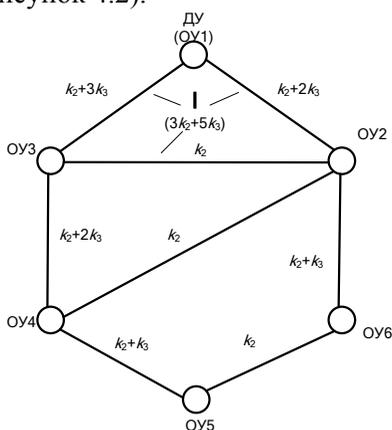


Рисунок 4.1 – Количество каналов между станциями на дорожном уровне с учетом резервирования

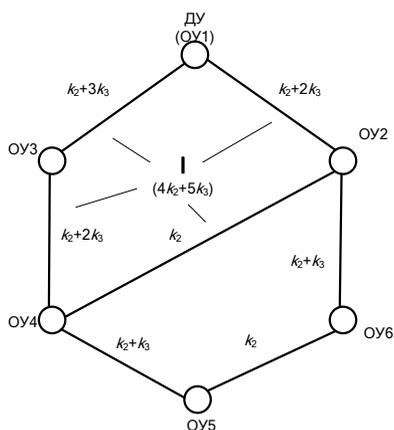


Рисунок 4.2 – Пример расположения одного и того же потока на двух участках, входящих в кольцо

Количество каналов участков следующих колец также определяется через сумму количества каналов всех участков кольца, но за исключением участков, вошедших в предыдущие кольца (рисунок 4.3) и т. д. Количество каналов участков, по которым проходят несколько колец равно сумме количества каналов этих колец (рисунок 4.4).

При невозможности построения кольцевой сети на дорожном уровне необходимо использовать плоские кольца. Подробное описание организации плоских колец приведено ниже.

На отделенческом уровне резервирование строится с использованием плоских колец. При этом одним плоским кольцом

охватываются все станции, расположенные между отделенческими узлами и входящие в их отделения дороги. Плоское кольцо предполагает использование в качестве резервной пары волокон волокна из того же волоконно-оптического кабеля, в котором расположены основные волокна. Одна пара волокон проходит через все мультиплексоры отделенческой сети станций участка, а вторая проходит транзитом через станции и соединяет только мультиплексоры в отделениях дороги, ограничивающих данный участок (см. рисунок 4.3).

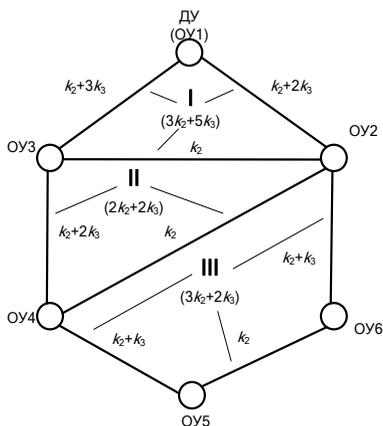


Рисунок 4.3 – Количество каналов в кольцах на дорожном уровне с учетом резервирования

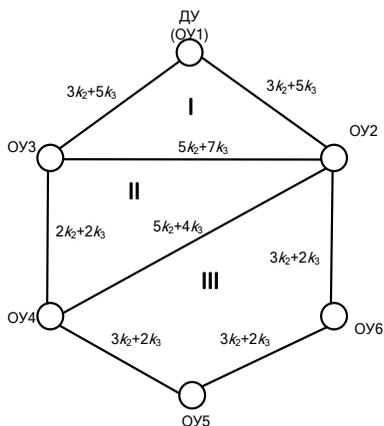


Рисунок 4.4 – Количество каналов между станциями на дорожном уровне с учетом резервирования

В качестве второй пары волокон плоского кольца отделенческой сети могут использоваться волокна, отведенные в кабеле для организации дорожной сети. В этом случае количество каналов дорожной сети на этих направлениях необходимо увеличить за счет добавления каналов отделенческой сети.

Общее количество каналов, передачу которых необходимо организовать в плоском кольце, равно сумме количества каналов между каждой из станций и соответствующим ей отделенческим узлом (рисунок 4.5).

Далее составляется сводная таблица с необходимым количеством каналов на всех участках железной дороги с учетом резервирования (таблица 4.1).

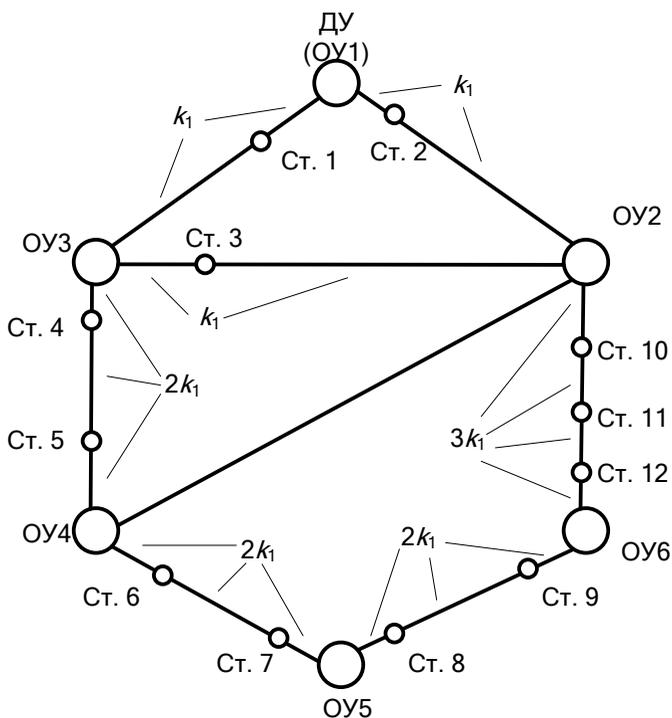


Рисунок 4.5 – Количество каналов между станциями на отделенческом уровне с учетом резервирования

Таблица 4.1 – Количество каналов на каждом из участков железной дороги с учетом резервирования

Участок	Каналы	Общее количество каналов СПД, ОТС и ОБТС	Количество Е1	Количество STM-1
ОУ2 – ОУ3	$5k_2 + 7k_3$	$9500E1 + 13000E0$	10134	161
ОУ2 – ОУ4	$5k_2 + 4k_3$	$6500E1 + 13000E0$	6934	111
ДУ (ОУ1) – ОУ2	$3k_2 + 5k_3$	$6500E1 + 13000E0$	6934	111
ДУ (ОУ1) – ОУ3				
ОУ2 – ОУ6	$3k_2 + 2k_3$	$3500E1 + 7000E0$	3734	60
ОУ4 – ОУ5				
ОУ5 – ОУ6				
ОУ3 – ОУ4	$2k_2 + 2k_3$	$3000E1 + 6000E0$	3200	51

Окончание таблицы 4.1

Участок	Каналы	Общее количество каналов СПД, ОТС и ОБТС	Количество Е1	Количество STM-1
ОУ2 – Ст.10	3к ₁	300Е1 + 600Е0	320	6
Ст.10 – Ст.11				
Ст.11 – Ст.12				
ОУ6 – Ст.12				
ОУ3 – Ст.4	2к ₁	200Е1 + 400Е0	214	4
Ст.4 – Ст.5				
ОУ4 – Ст.5				
ОУ4 – Ст.6				
Ст.6 – Ст.7				
ОУ5 – Ст.7				
ОУ5 – Ст.8				
Ст.8 – Ст.9				
ОУ6 – Ст.9				
ДУ (ОУ1) – Ст.1	к ₁	100Е1 + 200Е0	107	2
ДУ (ОУ1) – Ст.2				
ОУ3 – Ст.1				
ОУ2 – Ст.2				
ОУ2 – Ст.3				
ОУ3 – Ст.3				

5 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

5.1 Обзор технологий передачи данных

Плззиохронная цифровая иерархия (PDH/ПЦИ). Технология PDH/ПЦИ поддерживает следующие уровни иерархии цифровых каналов: абонентский или основной канал Е0 и пользовательские каналы уровней Е1, Е2, Е3, Е4. Уровень цифрового канала Е5 определен в рекомендациях МСЭ-Т, но на практике его обычно не используют. На основе технологии PDH/ПЦИ создаются цифровые

каналы транспортной сети с пропускной способностью (скоростью передачи) от 64 кбит/с до 140 Мбит/с (таблица 5.1).

Синхронная цифровая иерархия (SDH/СЦИ). Основным отличием технологии SDH/СЦИ от PDH/ПЦИ является переход на новый принцип мультиплексирования. Технология SDH/СЦИ является базовой сетевой технологией и представляет собой современную концепцию построения цифровой первичной (транспортной) сети. В настоящее время эта технология достигла своего совершенства как одна из наиболее разработанных и стандартизованных.

Таблица 5.1 – Общие характеристики ОЦК и сетевых трактов PDH/ПЦИ

Уровень PDH/ПЦИ	Номинальная скорость передачи, кбит/с	Пределы отклонения скорости передачи, кбит/с $\times 10^{-5}$
E0	64	± 5
E1	2048	± 5
E2	8448	± 3
E3	34368	± 2
E4	139264	$\pm 1,5$

Технология SDH/СЦИ в окончательной версии поддерживает уровни иерархии каналов со скоростями передачи 155,52; 622,08; 2488,32; 9953,28; и 39813,12 Мбит/с (таблица 5.2). В транспортной сети пользовательские интерфейсы, соответствующие синхронным транспортным модулям STM-*N* более низкого уровня иерархии, могут служить полезной нагрузкой для сетевых элементов более высокого уровня. Технология SDH/СЦИ основана на полной синхронизации цифровых каналов и сетевых элементов в пределах всей сети, что обеспечивается с помощью соответствующих систем синхронизации и управления транспортной сетью.

Цифровые каналы PDH/ПЦИ являются входными (полезной нагрузкой) для пользовательских интерфейсов сетей SDH/СЦИ. Применительно к европейскому стандарту интерфейсы передачи уровней E1, E3, E4 PDH/ПЦИ (в соответствии с Рекомендацией G.703) являются входными каналами для транспортной сети SDH/СЦИ, в которой они передаются по сетевым трактам в магистральных сети в виде виртуальных контейнеров соответствующего уровня. Цифровая

первичная (транспортная) сеть, как правило, строится на основе совокупности аппаратуры PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ. Технологии PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ взаимодействуют друг с другом через процедуры мультиплексирования и демultipлексирования цифровых потоков E1, E3 и E4 PDH/ПЦИ в аппаратуре SDH/СЦИ.

Таблица 5.2 – Уровни иерархии и скорости передачи SDH/СЦИ

Уровень SDH/СЦИ	Номинальная скорость передачи, Мбит/с	Примечание
STM-0 (STS-1)	51,84	Уровень STS-1 (SONET)
STM-1	155,52	ITU-T Рек. G.707
STM-4	622,08	ITU-T Рек. G.707
STM-16	2488,32	ITU-T Рек. G.707
STM-64	9953,28	ITU-T Рек. G.707
STM-256	39813,12	Применяется “де-факто”

Технология SDH/СЦИ по сравнению с PDH/ПЦИ имеет следующие особенности и преимущества:

- предусматривает синхронную передачу и мультиплексирование, что приводит к необходимости построения систем синхронизации сети;
- предусматривает прямое мультиплексирование и прямое демultipлексирование (ввод-вывод) цифровых потоков PDH/ПЦИ;
- основана на стандартных оптических и электрических интерфейсах, что обеспечивает совместимость аппаратуры различных производителей;
- позволяет объединить системы PDH/ПЦИ европейской и американской иерархии;
- обеспечивает полную совместимость с аппаратурой PDH/ПЦИ, АТМ и IP;
- обеспечивает многоуровневое управление и самодиагностику транспортной сети.

Эти преимущества обусловили широкое применение SDH/СЦИ как современной базовой технологии построения цифровых первичных сетей связи.

Технология (АТМ/АРП). Эта технология основанная на статистическом мультиплексировании различных входных сигналов, разрабатывалась сначала как часть широкополосной технологии В-ISDN. Она предназначена для высокоскоростной передачи различного

трафика: голоса, данных, видео и мультимедиа и ориентирована на использование физического уровня высокоскоростных сетевых технологий, таких как SDH/СЦИ, FDDI и др. В технологии АТМ/АРП базовые значения скоростей передачи для интерфейсов доступа (пользовательских интерфейсов) соответствуют цифровым каналам $E0$, $n \times E0$, $E1$, $E3$, $E4$ PDH/ПЦИ, АТМ (25 Мбит/с), Fast Ethernet, FDDI (100 Мбит/с) и некоторым другим, а базовые скорости линейных интерфейсов передачи соответствуют скоростям передачи цифровых каналов STM- N ($N = 1, 4, 16, 64$) SDH/СЦИ.

Технология АТМ опирается на принципы статистического мультиплексирования и подчиняется его законам. Разработчики технологии АТМ стремились к компромиссу между механизмами мультиплексирования SyTDM и StTDM, стараясь взять все самое лучшее от обоих, в надежде обеспечить однородную структуру сетей связи. Закономерно, что эта технология обладает и некоторыми недостатками обоих принципов мультиплексирования, но она была первой технологией, на основе которой вместо стандартных и многочисленных сетей телефонной, телеграфной, факсимильной связи и сетей передачи данных (каждая из которых в свою очередь рассчитана на обеспечение только одного вида связи со своим способом переноса информации) предполагалось построить единую цифровую сеть на базе широкого использования ВОЛС. Однако из-за высокой стоимости аппаратуры АТМ и широкого проникновения протокола IP в сети в глобальных масштабах, высокоскоростные интерфейсы для транспортировки которого появились в последние годы, не позволили осуществлению этих планов.

Технологию АТМ не удалось на аппаратном уровне довести до конкретного пользователя, поэтому потребовалась прослойка из протокола IP, приводящая к дополнительным непроизводительным затратам на передачу сетевого трафика.

Технология WDM/DWDM. Технология WDM (Wavelength Division Multiplexing) позволяет создавать гибкие разветвленные оптические сети с практически неограниченными возможностями роста полосы пропускания. Ее суть заключается в том, что по одному оптическому волокну одновременно передаются несколько информационных каналов на разных длинах волн, что позволяет максимально эффективно использовать возможности оптического волокна.

Первые системы WDM имели два канала в окнах 1330 и 1550 нм. Затем появились 4-канальные системы, с расстоянием между каналами 8–10 нм в окне 1550 нм. В последствии появилась технология плотного волнового мультиплексирования DWDM (Dense WDM) с 8, 16, 32, 64 каналами.

Принцип передачи сигналов нескольких передатчиков по одному волокну с использованием DWDM отражен на рисунке 5.1. Сигналы разных длин волн, генерируемые несколькими оптическими передатчиками, объединяются мультиплексором в многоканальный составной оптический сигнал, который далее распространяется по оптическому волокну. При необходимости используются транспондеры, которые переносят сигнал передатчика на нужную длину волны. Объединение оптических сигналов происходит в пассивных устройствах. Потому на выходе мультиплексора устанавливается оптический усилитель, чтобы поднять мощность передатчика до нужного уровня. При больших длинах линий связи могут дополнительно устанавливаться промежуточные усилители.

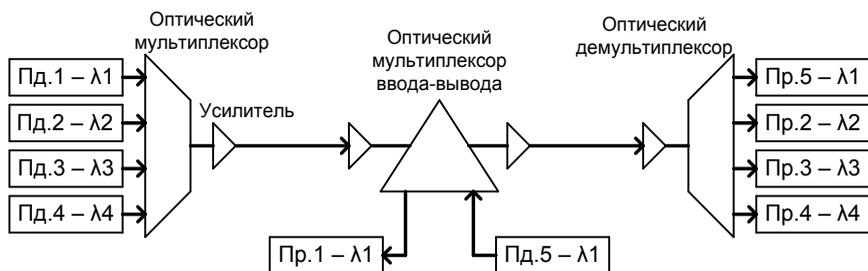


Рисунок 5.1 – Типовая транспортная сеть на основе технологии DWDM

На приемной стороне установлен демультиплексор, который принимает составной сигнал, выделяет из него исходные каналы разных длин волн и направляет их на соответствующие приемники. Возможна также установка мультиплексоров ввода-вывода в промежуточных узлах. В технологии DWDM повышение пропускной способности волоконно-оптической линии связи происходит не путем увеличения скорости передачи в едином составном канале, а путем увеличения числа каналов (длин волн), применяемых в системах передачи.

Для того чтобы оборудование и компоненты систем DWDM были взаимозаменяемы и могли взаимодействовать между собой, необходимо использовать стандартный набор частот, на которых ведется пе-

редача сигналов. Стандарт ITU-T G.692 определяет стандартный набор частот – частотный план систем DWDM. Он представляет собой набор стандартных частот на основе базовой частоты 193100 ГГц. Стандартные частоты располагаются выше и ниже этой частоты с частотным интервалом в 50 ГГц. В таблице 5.3 показана структура частотного плана DWDM с указанием стандартизированной частоты и соответствующей ей длины волны. При этом средний шаг между длинами волн составляет 0,4 нм. Стандартные длины волн расположены в оптических диапазонах «С» и «L» – по 80 в каждом. Помимо этого, каждый диапазон разделен на два поддиапазона – синий и красный с более высокими и более низкими частотами соответственно.

Таблица 5.3 – Стандартный канальный план G.692

Название диапазона частот		Частота, ТГц	Длина волны, нм
С-диапазон	Синий поддиапазон	196,10	1528,77
		196,05	1529,16
		196,00	1529,55
	
		193,80	1546,91
		193,75	1547,31
	Красный поддиапазон	193,70	1547,71
		193,65	1548,11
		193,60	1548,51
		193,55	1548,91
	
		191,80	1563,04
		191,75	1563,45
		191,70	1563,86
L-диапазон	Синий поддиапазон	190,90	1570,41
		190,85	1570,82
		190,80	1571,24
	
		188,60	1589,56
		188,55	1589,99
	Красный поддиапазон	188,50	1590,41
		188,45	1590,83
		188,40	1591,25
		188,35	1591,67
	
		186,60	1606,60
		186,55	1607,03
		186,50	1607,46

Таким образом, стандартная наибольшая скорость передачи по каналу в этом случае должна быть не более 10 Гбит/с (STM-64). Можно использовать набор частот с шагом в 100 или 200 ГГц, но с увеличением разнеса между частотами уменьшается возможное количество каналов.

В таблице 5.4 показана часть сетки частотного плана С-диапазона с разной степенью разнесения частот между каналами, начиная от 100 ГГц. Все сетки, кроме одной 400/500, имеют равноудаленные по оптической несущей частоте каналы. Равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств полностью оптической сети, а также облегчает возможность ее дальнейшего наращивания.

Реализация той или иной сетки частотного плана во многом зависит от типа используемых волоконно-оптических усилителей на основе кварца, легированного эрбием EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), скорости передачи в каналах – STM-16 (2,5 Гбит/с), STM-64 (10 Гбит/с) или STM-256 (40 Гбит/с) и влияния нелинейных эффектов в волокне оптического усилителя.

Более плотная, пока еще не стандартизированная сетка частотного плана, с интервалом в 50 ГГц позволяет эффективнее использовать спектральный диапазон длин волн 1540–1560 нм, в котором работают стандартные оптические усилители EDFA. Однако, во-первых, с уменьшением межканальных интервалов растет влияние эффекта четырехволнового смешения в волокне оптического усилителя, что ограничивает максимальную длину регенерационного участка линии. Во-вторых, при уменьшении межканального интервала по длине волны до значения примерно 0,4 нм начинают проявляться ограничения по мультиплексированию каналов более высокого уровня, например STM-64 (рисунок 5.2).

Очевидно, что мультиплексирование каналов уровня STM-64, имеющих частотный интервал 50 ГГц, недопустимо из-за перекрытия спектров соседних каналов. Кроме того, частотный интервал в 50 ГГц накладывает более жесткие требования к перестраиваемым лазерам, мультиплексорам и другим компонентам аппаратуры систем DWDM ведет к увеличению ее стоимости.

Таблица 5.4 – Частотный каналный план ITU-T для систем DWDM

Частота оптической несущей, ТГц	Частотный интервал, ГГц						Длина волны, нм
	100	200	400	400/500	600	1000	
196,1	*	*					1528,77
196,0	*						1529,55
195,9	*	*					1530,33
195,8	*						1531,12
195,7	*	*					1531,90
195,6	*						1532,68
195,5	*	*			*	*	1533,47
195,4	*						1534,25
195,3	*	*		*			1535,04
195,2	*						1535,82
195,1	*	*					1536,61
195,0	*						1537,40
194,9	*	*			*		1538,19
194,8	*			*			1538,98
194,7	*	*					1539,77
194,6	*						1540,56
194,5	*	*				*	1541,35
194,4	*						1542,14
194,3	*	*		*	*		1542,94
194,2	*						1543,73
194,1	*	*					1544,53
194,0	*						1545,32
193,9	*	*	*	*			1546,12
193,8	*						1546,92
193,7	*	*	*		*		1547,72
193,6	*						1548,51
193,5	*	*	*			*	1549,32
193,4	*			*			1550,12
193,3	*	*	*				1550,92
193,2	*						1551,72
193,1	*	*	*		*		1552,52
193,0	*			*			1553,33
192,9	*	*	*				1554,13
192,8	*						1554,94
192,7	*	*	*				1555,75
192,6	*						1556,55
192,5	*	*	*	*	*	*	1557,36
194,4	*						1558,17
192,3	*	*	*				1558,98
192,2	*						1559,79
192,1	*	*		*			1560,61

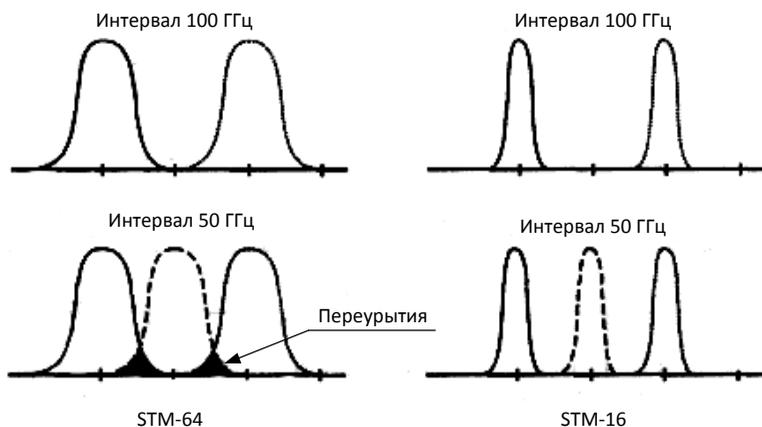


Рисунок 5.2 – Спектральное размещение каналов разного уровня в оптическом волокне

Понимание того, какие ограничения и преимущества имеет каждый частотный план, позволяет при планировании развития и наращивании пропускной способности сети сознательно подходить к выбору аппаратуры DWDM и избежать значительных трудностей и излишних капитальных затрат при построении магистральных транспортных сетей на основе такой технологии.

В настоящее время ведутся работы по созданию надежных оптических усилителей EDFA, обеспечивающих большую линейность коэффициента усиления (во всей спектральной области 1530–1560 нм). С увеличением рабочей области оптических усилителей EDFA становится возможным мультиплексирование 40 каналов STM-64 с частотным интервалом 100 ГГц общей емкостью полосы 400 ГГц в расчете на одно оптическое волокно.

Технология спектрального уплотнения имеет огромные преимущества. Рост пропускной способности при использовании технологии DWDM осуществляется без дорогостоящей замены оптического кабеля. Достаточно только лишь установить соответствующее оборудование. При этом при достаточно хорошем качестве линии связи данная технология позволяет постепенно наращивать пропускную способность транспортной сети путем введения дополнительных оптических несущих. Тем самым обеспечивается громадный запас пропускной способности сети при умелом ее планировании с учетом

тенденций роста объемов передаваемого трафика. Можно увеличить жизненный цикл оборудования, получив, тем самым, дополнительную прибыль от ее эксплуатации.

Применение технологии DWDM позволяет операторам связи использовать одну волоконно-оптическую линию связи для организации нескольких «виртуальных волокон». Целесообразно использовать одно волокно вместо нескольких, так как не используются лишние оптические усилители, а также проще проводить мониторинг и обслуживание сети.

5.2 Обзор оборудования передачи данных

Оптический DWDM мультиплексор Siemens SURPASS hiT 7550. Система SURPASS hiT 7550, помимо мультиплексирования длин волн, предлагает широкий набор дополнительных возможностей. Среди них:

- оптический диспетчерский канал, который реализует возможности управления оптическими элементами всей сети;
- система аварийного снижения мощности лазера, защищающая персонал от облучения;
- система управления транспортной сетью TMNS.

Данная система позволяет использовать до 160 длин волн и осуществлять двунаправленную передачу информации по паре оптических волокон со скоростью до 1,6 Тбит/с. Притом 80 длин волн находятся в *C*-диапазоне и еще 80 – в *L*-диапазоне с разнесением между ними в 50 ГГц. Причем процедура мультиплексирования является многоуровневой, начиная от 20 каналов с разнесом в 100 ГГц и заканчивая объединением *C*- и *L*-диапазонов по 80 каналов в каждом. Путем установки различных типов и количества карт оптических мультиплексоров можно добиваться требуемой конфигурации оборудования.

На рисунке 5.3 показаны логические соединения между мультиплексорами DWDM Siemens SURPASS hiT 7550. На схеме показаны модули оптических мультиплексоров и демультимплексоров, а также платы интерфейса оптической линии связи.

Данный рисунок отражает особенность технологии DWDM, которая преимущественно работает по топологии «точка – точка». Платы OLI непосредственно связаны с волоконно-оптической линией связи. Притом плата OLITPNC является предварительным усилителем сиг-

нала в направлении приема, а плата OLITBNC – усилителем в направлении передачи. Основные и резервные сигналы STM-64 от оборудования SDH в направлении передачи поступают на платы оптических мультиплексоров и в направлении приема выводятся с плат оптических демультиплексоров.

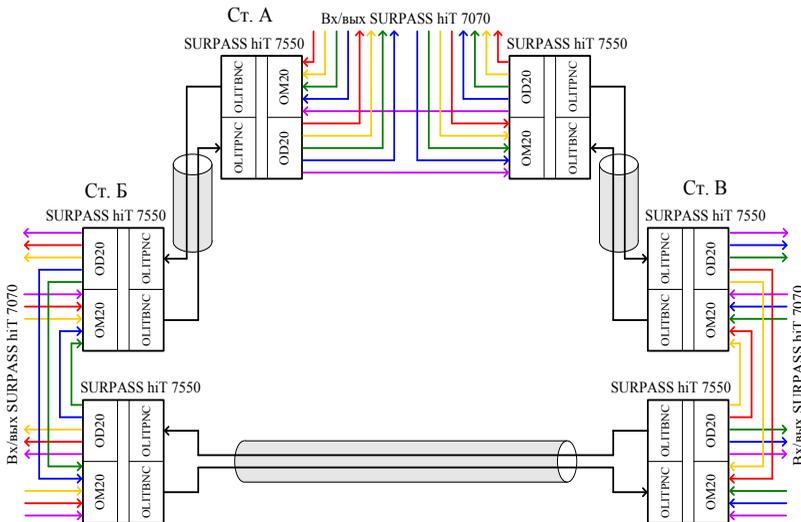


Рисунок 5.3 – Логические связи между мультиплексорами DWDM

Для каждого направления связи необходима установка по одному комплекту плат OM20 и OD20, а также плат OLITPNC и OLITBNC. Для тех длин волн, которые передаются через узел сети транзитом, осуществляется соединение непосредственно выхода платы оптического демультиплексора одного направления с соответствующим входом платы оптического мультиплексора другого направления. Таким образом, не осуществляется вывод и обработка транзитных сигналов в промежуточных узлах сети.

Мультиплексор SDH/СЦИ Siemens SURPASS hiT 7070. Основное назначение системы SURPASS hiT 7070 – преобразование пакетов Ethernet с помощью процедуры GFP и последующая их передача поверх технологии SDH с обратным преобразованием и выводом кадров Ethernet на приемной стороне. Притом поверх уровня STM-64 (10 Гбит/с) возможна передача до 2,5 Гбит/с Ethernet трафика.

Системы DWDM и SDH образуют два различных уровня транспортной сети. Они функционируют и управляются независимо друг

от друга, то есть сеть DWDM является прозрачной для всех других технологий передачи информации и, соответственно, может предоставлять оптическую среду для различных технологий в одном волокне. На мультиплексоры SDH возлагаются функции контроля качества передачи данных, а также функции защиты трафика. В случае потери сигнала по основному направлению мультиплексор SDH будет принимать сигнал с резервного направления.

На рисунке 5.4 показан пример организации логических соединений между мультиплексорами SDH/СЦИ Siemens SURPASS hiT 7070. Также на рисунке изображены интерфейсные платы мультиплексоров (резервирование организовано по схеме 1+1 или 1:1 по разнесенным трассам, резервные платы показаны на сером фоне). Разные линии логических соединений между мультиплексорами соответствуют различным длинам волн, вводимых в волоконно-оптический кабель. При этом резервное и основное направления передачи информации имеют одну длину волны. Выбор длин волн для организации связи осуществляется соответствии с рекомендацией ITU-T G.692 из стандартного перечня частот, приведенного в таблице 5.3.

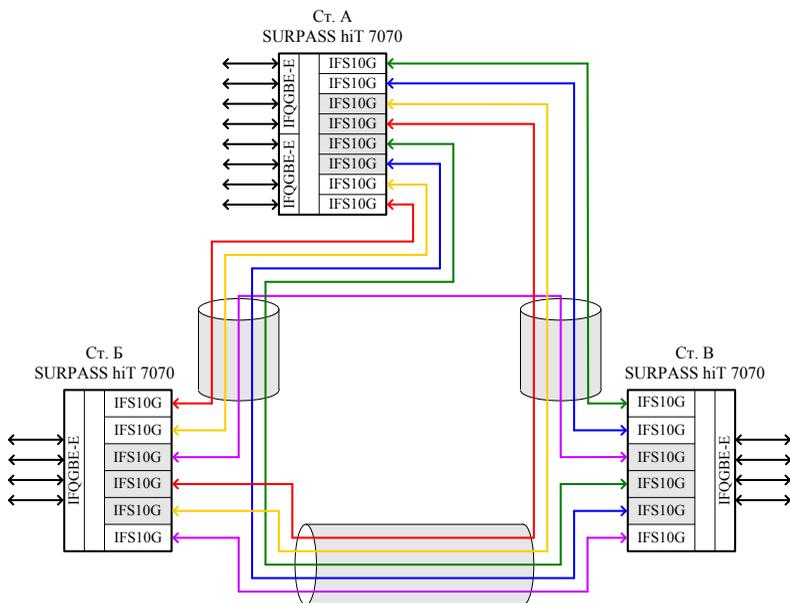


Рисунок 5.4 – Логические связи между мультиплексорами SDH/СЦИ

В мультиплексоре Siemens SURPASS hiT 7070 возможна функция WDM 40 Гбит/с, которая выполняется при помощи оптического мультиплексирования/демультиплексирования MUX/DEMUX. Оптический мультиплексор/демультиплексор 40 Гбит/с объединяет четыре потока со скоростями 10 Гбит/с в единый оптический сигнал со скоростью 40 Гбит/с. При использовании функции WDM 40 Гбит/с устройство MUX/DEMUX входит в состав системы SURPASS hiT 7070. На рисунке 5.5 представлена логическая связь между мультиплексорами SURPASS hiT 7070 и SURPASS hiT 7550 при их совместном использовании.

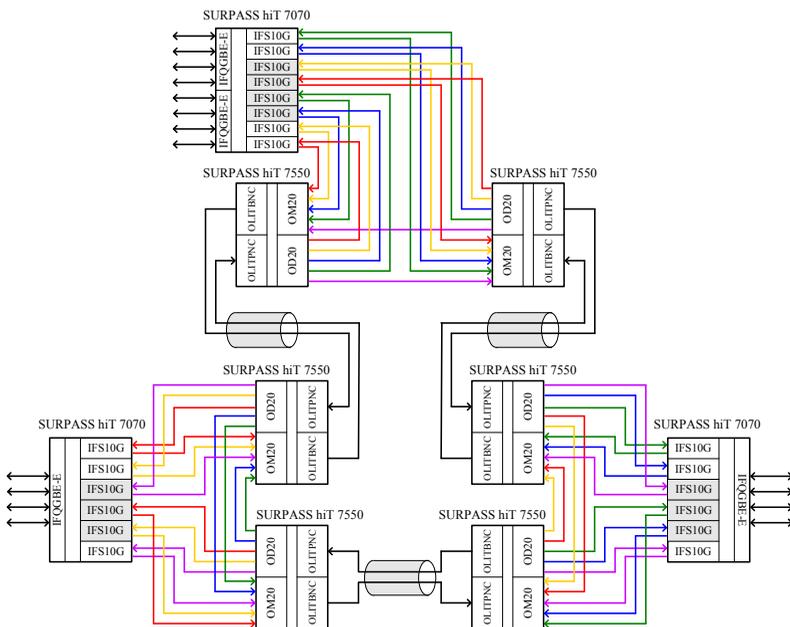


Рисунок 5.5 – Логические связи между мультиплексорами SDH/СЦИ и DWDM

Мультиплексор SDH/СЦИ SMA4/1. Мультиплексор SMA4/1 является новым поколением синхронного мультиплексора стандарта SDH, выполняющим мультиплексирование трибутарных сигналов PDH и SDH в агрегатный сигнал уровня STM-4. Продукт состоит из общего модуля аппаратно-программного обеспечения для сетевых приложений STM-1 и STM-4. Мультиплексор SMA4/1 обладает вы-

сокой степенью гибкости: он может использоваться как мультиплексор вставки/выделения, как местный кросс-коннектор или как обычный линейный терминал.

Мультиплексор SMA4/1 предлагает гибкое оснащение трибутарных интерфейсов в пределах от 2 Мбит/с PDH до оптических и электрических стыков STM-1 синхронной цифровой иерархии. Оборудование может вмещать ряд трибутарных съемных модулей, обеспечивающих 100-процентную вставку/выделение через неблокирующую матрицу коммутации с эффективной ёмкостью в 16 эквивалентов STM-1 (или 1008 TU-12). Возможны выделение и вставка на всех уровнях VC, в частности VC-4, VC-3 и VC-12.

Одной из основных характеристик SMA4/1 является общая платформа аппаратно-программного обеспечения, позволяющая без ограничений выполнять вставку/выделение сигналов, передаваемые со скоростью 2 Мбит/с (VC-12), непосредственно из линейных сигналов STM-1 или STM-4. В SMA4/1 имеется возможность выделения до 252 портов (по 2 Мбит/с) (42 порта на модуль) с резервированием трибутарных модулей 1:N.

Основные характеристики мультиплексора:

- трибутарные электрические интерфейсы со скоростью передачи 2, 34, 45 и 140 Мбит/с, оптические и электрические интерфейсы STM-1, Ethernet 10/100 base T, Ethernet 100, а также оптические интерфейсы STM-4;
- емкость матрицы кросс-коммутации 16 x STM-1 эквивалентов на уровне AU-4, TU-3, -2, -12;
- функция полной вставки/выделения до 8 x STM-1 портов SDH и до 252 x 2 Мбит/с портов PDH;
- возможность создания неблокируемых соединений линия – линия, линия – триб и триб – триб;
- кольцевое межсоединение для колец на стороне линии и триба;
- встроенные оптические усилители для оптических интерфейсов STM-4;
- система защиты трафика, включая: 1+1 защиту секции мультиплексора для линейных и оптических трибутарных интерфейсов; 2-волоконное защитное переключение MS-SPRing (BSHR-2) для линейных и трибутарных сигналов STM-4 в конфигурациях самовос-

становливающегося кольца; SNC/P (защита тракта передачи), включая "Drop & continue";

- защита оборудования: 1:1 – защита модулей для всех оптических интерфейсов вместе с защитой секции мультиплексора (переключение модулей); 1+1 – защита модулей для трибутарных интерфейсов 34 /45 Мбит/с; 1:n ($n \leq 3$) – защита модулей для трибутарных электрических интерфейсов 140 Мбит/с/ STM-1; 1:n ($n \leq 6$) – защита модулей для трибутарных интерфейсов 2 Мбит/с; опциональное резервирование модулей коммутации и синхронизации; распределенные встроенные вторичные источники питания;

- автоматическое выключение лазера в соответствии с рекомендациями МСЭ G.958;

- возможность загрузки ПО во все соответствующие модули системы;

- поддержка служебной связи (EOW) и служебных каналов передачи данных (V.11, G.703);

- управление непрерывным сцеплением сигналов VC-4-4с (с помощью преобразователя);

- межсетевой обмен синхронных оптических сетей с сигналами STS-3-3с, STS-12-3с, STS-12-12с, STS - 48-3с, STS-48-12с и STS-48-48с;

- измерение параметров (PM) на ближнем и дальнем конце на всех сигнальных уровнях.

Оборудование SMA4/1 представляет собой мультиплексор ввода/вывода STM-4, который также может использоваться в сетевых приложениях STM-1, с возможностью осуществлять коммутацию сигналов на уровнях VC-4, VC-3 и VC-12. Матрица коммутации состоит из двух модулей – SN-64 и IPU-16. Для повышения живучести системы применяется дублирование этих модулей. Модуль SN-64, кроме этого, выполняет роль модуля синхронизации и обеспечивает распределение синхросигнала внутри сетевого элемента.

Модуль контроллера SCU-R2E позволяет осуществлять контроль и мониторинг сетевого элемента SMA4/1. Все данные TMN системы обрабатываются модулем контроллера.

Линейные оптические модули OIS-4D поддерживают оптико-электрические преобразования линейного сигнала.

Трибутарные оптические модули уровня STM-1 имеют четыре оптических порта. SMA4/1 поддерживает несколько Ethernet интерфей-

сов – 4-портовый модуль base T (2 порта упаковываются в VC-12, два порта в VC-3) и однопортовый модуль Ethernet 100 (порт упаковывается в VC-4).

Мультиплексор SDH/СЦИ SMA16/4. Мультиплексор SMA16/4 является новым поколением синхронного мультиплексора стандарта SDH, выполняющим мультиплексирование трибутарных сигналов PDH и SDH в агрегатный сигнал уровня STM-16. Продукт состоит из общей модулейформы аппаратно-программного обеспечения для сетевых приложений STM-1, STM-4 и STM-16. Мультиплексор SMA16/4 обладает высокой степенью гибкости: он может использоваться как мультиплексор вставки/выделения, как местный кросс-коннектор или как обычный линейный терминал.

Мультиплексор SMA16/4 предлагает гибкое оснащение трибутарных интерфейсов в пределах от 2 Мбит/с PDH до оптических и электрических стыков STM-1 и оптических стыков STM-4 синхронной цифровой иерархии. Оборудование может вмещать ряд трибутарных съемных модулей, обеспечивающих 100-процентную вставку/выделение через неблокирующую матрицу коммутации с эффективной ёмкостью в 64 эквивалентов STM-1 (или 4032 TU-12). Возможны выделение и вставка на всех уровнях VC, в частности VC-4, VC-3 и VC-12.

Одной из основных характеристик SMA16/4 является общая платформа аппаратно-программного обеспечения, позволяющая без ограничений выполнять вставку/выделение сигналов, передаваемых со скоростью 2 Мбит/с (VC-12), непосредственно из линейных сигналов STM-1, STM-4 и STM-16. В SMA16/4 имеется возможность выделения до 252 портов (по 2 Мбит/с) (42 порта на модуль) с возможностью резервирования трибутарных модулей 1:N. Благодаря соединению SMA16/4 с SMA4/1 на оптическом уровне STM-1 или STM-4 (с дополнительной защитой секции мультиплексора MSP 1+1) в одной стойке ETSI или 19-дюймовой стойке возможно размещение до 504 полностью защищенных портов (2 Мбит/с) в двух независимых группах с резервированием трибутарных модулей 1:N.

Основные характеристики мультиплексора:

- оптические линейные интерфейсы STM-16 для применения в волоконно-оптических линиях в соответствии с Рекомендациями МСЭ G.692;

- трибутарные электрические интерфейсы со скоростью передачи 2, 34, 45 и 140 Мбит/с, оптические и электрические интерфейсы STM-1, Ethernet 10/100 base T, Ethernet 100, а также оптические интерфейсы STM-4;
- емкость матрицы кросс-коммутации 64 x STM-1 эквивалентов на уровне AU-4, TU-3, -2, -12;
- функция полной вставки/выделения до 32 x STM-1 портов SDH и до 252 x 2 Мбит/с портов PDH;
- возможность создания неблокируемых соединений линия – линия, линия – триб и триб – триб;
- кольцевое межсоединение для колец на стороне линии и триба;
- система защиты трафика, включая: 1 + 1 защиту секции мультимплексора для линейных и оптических трибутарных интерфейсов; 2-волоконное защитное переключение MS-SPRing (BSHR-2) для линейных и трибутарных сигналов STM-16, STM-4 в конфигурациях самовосстанавливающегося кольца; SNC/P (защита тракта передачи), включая "Drop & continue";
- защита оборудования: 1:1 – защита модулей для всех оптических интерфейсов вместе с защитой секции мультимплексора (переключение модулей); 1+1 – защита модулей для трибутарных интерфейсов 34 /45 Мбит/с; 1:n ($n \leq 3$) – защита модулей для трибутарных электрических интерфейсов 140 Мбит/с/ STM-1; 1:n ($n \leq 6$) – защита модулей для трибутарных интерфейсов 2 Мбит/с; опциональное резервирование модулей коммутации и синхронизации; распределенные встроенные вторичные источники питания;
- автоматическое выключение лазера в соответствии с рекомендациями МСЭ G.958;
- возможность загрузки ПО во все соответствующие модули системы;
- поддержка служебной связи (EOW) и служебных каналов передачи данных (V.11, G.703);
- управление непрерывным сцеплением сигналов VC-4-4с (с помощью преобразователя);
- межсетевой обмен синхронных оптических сетей с сигналами STS-3-3с, STS-12-3с, STS-12-12с, STS-48-3с, STS-48-12с и STS-48-48с;
- измерение параметров (PM) на ближнем и дальнем концах на всех сигнальных уровнях;

– внутриполосное прямое исправление ошибок (FEC) для оптических линий связи STM-16.

Оборудование SMA16/4 представляет собой мультиплексор ввода/вывода STM-16, который также может использоваться в сетевых приложениях STM-4 и STM-1, с возможностью осуществлять коммутацию сигналов на уровнях VC-4, VC-3 и VC-12. Матрица коммутации состоит из двух модулей – SN-64 и IPU-16. Для повышения живучести системы применяется дублирование этих модулей. Модуль SN-64, кроме этого, выполняет роль модуля синхронизации и обеспечивает распределение синхросигнала внутри сетевого элемента.

Модуль контроллера SCU-R2E.16 позволяет осуществлять контроль и мониторинг сетевого элемента SMA16/4. Все данные TMN системы обрабатываются модулем контроллера.

Линейные оптические модули OIS-4D поддерживают оптико-электрические преобразования линейного сигнала.

Трибутарные оптические модули уровня STM-4 имеют один оптический порт, а STM-1 – четыре оптических порта. SMA16/4 поддерживает несколько Ethernet интерфейсов – 4-портовый модуль base T (2 порта упаковываются в VC-12, два порта – в VC-3) и однопортовый модуль Ethernet 100 (порт упаковывается в VC-4).

Мультиплексор SDH/СЦИ SL64. Оборудование синхронизированной автоматической линии SL64 подходит для передачи сигналов синхронизированной цифровой иерархической системы SDH, синхронной оптической сети SONET и плезиохронных.

На стороне линии электропередачи передаются сигналы со скоростью передачи 10 Гбит/с. Задействованный канал передачи представляет собой одномодовое стекловолокно в диапазоне волн около 1550 нм. Сигнал оптической линии связи представляет собой сигнал STM-64 международной иерархии цифровой синхронной передачи. Основные характеристики международной иерархии цифровой синхронной передачи определяются в рекомендации сектора стандартизации электросвязи МСЭ (ITU-T) G.707 (03/96).

На вспомогательной стороне (стороне подачи), в зависимости от оборудования, имеются интерфейсы:

- для электрических сигналов плезиохронной цифровой иерархии PDH-E4 и/или электрических сигналов STM-1;
- оптических STM-16, STM-4 и STM-1 сигналов;

- оптических сигналов несущей оптического диапазона ОС-48, ОС-12 и ОС-3 синхронной оптической сети SONET;
- полнодуплексной транспарентной локальной сети Gigabit Ethernet свыше VC-4 или VC-4-4v (1000Base);
- полнодуплексной транспарентной высокоскоростной локальной сети Ethernet свыше VC-4 (100Base).

Для использования с приборами спектрального разделения по длинам волн WDM от “Siemens” в наличии имеются специальные оптические модули. Для них выбирается соответствующая длина оптической волны в соответствии с рекомендацией сектора стандартизации электросвязи МСЭ (ITU-T) G.692.

6 ВЫБОР ТИПА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Волоконно-оптический кабель представляет собой сложную многокомпонентную конструкцию, содержащую ОВ, совокупность элементов назначение которых, во-первых, защищать ОВ от механических повреждений, возникающих в процессе изготовления, транспортировки, прокладки и эксплуатации кабеля, и, во-вторых, сохранять стабильными параметры передачи ОВ в течение всего срока службы кабеля (примерно 25 лет).

В настоящее время в нашей стране и за рубежом разработано много конструкций ВОК для прокладки внутри помещений, в кабельной канализации или траншеях, для воздушной подвески и др. Особую группу составляют кабели для сетей связи и систем автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта.

Конструкция кабеля должна обеспечить функционирование современного оборудования, работающего по линиям с кодами HDB-3, 2B1Q, CAP, TC-PAM, а также технологии xDSL в диапазоне частот до 2048 кГц.

6.1 Кабели для подвески на опорах

Подвесные волоконно-оптические кабели типа ОКЛ8, ОКТ (ADSS), ОКТ8, ОКЛ (ADSS) предназначены для подвески и эксплуатации на опорах воздушных линий связи, городского электротранспорта и воздушных линиях электропередачи в условиях воздействия нагрузок от ветра, гололёда, температуры и их комбинаций. При

электрическом потенциале в точке подвеса более 12 кВ применяется трекингостойкий полиэтилен для оболочек.

Структура кабеля ОКЛ (рисунок 6.1, а):

- 1 – центральный силовой элемент (стеклопластиковый стержень);
- 2 – оптические волокна;
- 3 – оптический модуль;
- 4 – кордель;
- 5 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 6 – скрепляющая обмотка из нитей и лент;
- 7 – промежуточная оболочка из полиэтилена;
- 8 – упрочняющий слой (арамидные нити);
- 9 – наружная оболочка из полиэтилена.

Структура кабеля ОКТ (рисунок 6.1, б):

- 1 – оптические волокна, сгруппированные в пучки;
- 2 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 3 – центрально-расположенная трубка;
- 4 – силовой элемент (повив арамидных нитей);
- 5 – оболочка из полиэтилена;
- 6 – шнур режущий.

Структура кабеля ОКЛ8 (рисунок 6.1, в):

- 1 – несущий элемент (стальной канат);
- 2 – центральный силовой элемент (стеклопластиковый стержень);
- 3 – оптические волокна;
- 4 – оптический модуль;
- 5 – кордель (по заказу медные изолированные жилы дистанционного питания);
- 6 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 7 – скрепляющая обмотка из нитей и лент;
- 8 – периферийный силовой элемент (арамидные нити);
- 9 – оболочка из полиэтилена.

Структура кабеля ОКТ8 (рисунок 6.1, г):

- 1 – несущий элемент (стальной канат);
- 2 – оптические волокна;
- 3 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 4 – центрально-расположенная трубка;
- 5 – водоблокирующая лента;
- 6 – металлопластмассовая оболочка с применением алюминиевой ламинированной ленты.

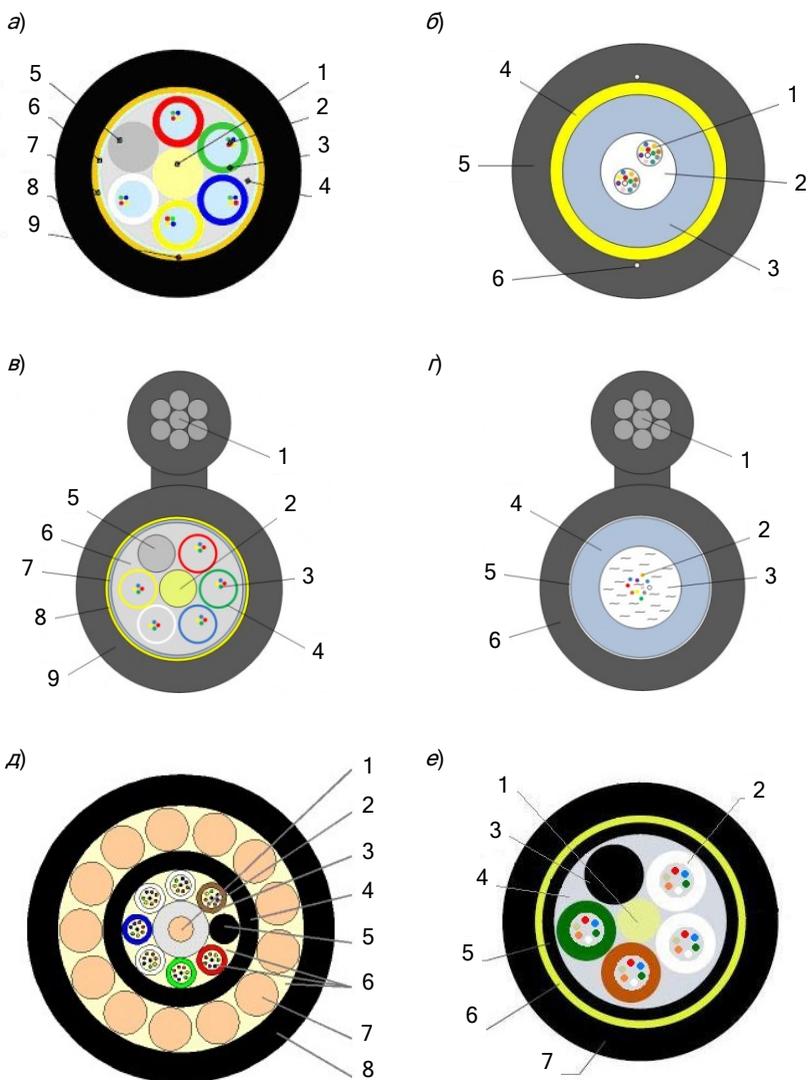


Рисунок 6.1 – Волоконно-оптические кабели для подвески на опорах

Подвесные волоконно-оптические кабели типа ДПМ и ДПТ предназначены для подвески на опорах линий связи, контактной сети железных дорог, ЛЭП. При особо высоких требованиях по устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям или наличию специ-

альных требований по стойкости к медленной электрокоррозии кабель изготавливается с внешней оболочкой из дугостойкого материала и может содержать от 2 до 144 оптических волокон.

Структура кабеля ДПМ (рисунок 6.1, *д*):

- 1 – центральный силовой элемент (стеклопластиковый стержень);
- 2 – ПБТ-модуль со свободно уложенными оптическими волокнами и гидрофобным гелем;
- 3 – кордель;
- 4 – межмодульный гидрофобный наполнитель;
- 5 – промежуточная полиэтиленовая оболочка;
- 6 – армирование стеклопластиковыми стержнями;
- 7 – наружная черная полиэтиленовая оболочка с маркировкой.

Структура кабеля ДПТ (рисунок 6.1, *е*):

- 1 – центральный силовой элемент (стеклопластиковый стержень);
- 2 – ПБТ-модуль со свободно уложенными оптическими волокнами и гидрофобным гелем;
- 3 – кордель;
- 4 – межмодульный гидрофобный наполнитель;
- 5 – промежуточная полиэтиленовая оболочка (для кабелей в исполнении с усиленной баллистической защитой оболочка из полиамидных материалов);
- 6 – повив из арамидных нитей с подклеивающим компаундом;
- 7 – наружная черная полиэтиленовая оболочка с маркировкой.

Для сетей связи железных дорог ЗАО «ТрансВок» (Россия) выпускает диэлектрический кабель ОКМС для прокладки на опорах контактной сети электрифицированных железных дорог и высоковольтных линиях автоблокировки.

6.2 Кабели для прокладки непосредственно в грунт

Бронированные волоконно-оптические кабели типа ОКЛК, ОКТК и ОКТБг предназначены для эксплуатации при повышенных требованиях устойчивости к механическим воздействиям при прокладке ручным и/или механизированными способами непосредственно в грунтах всех категорий, в том числе в районах с высокой коррозионной агрессивностью и территориях, заражённых грызунами, в районах сыпучих грунтов и грунтовых через болота, озёра, сплавные и судоходные реки глубиной до 50 метров.

Структура кабеля ОКЛК (рисунок 6.2, а):

- 1 – центральный силовой элемент (стеклопластиковый стержень);
- 2 – оптические волокна;
- 3 – оптический модуль;
- 4 – кордель (по заказу медные изолированные жилы дистанционного питания);
- 5 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 6 – скрепляющая обмотка из нитей и лент;
- 7 – оболочка из полиэтилена;
- 8 – броня из круглых стальных оцинкованных проволок;
- 9 – защитный шланг из полиэтилена.

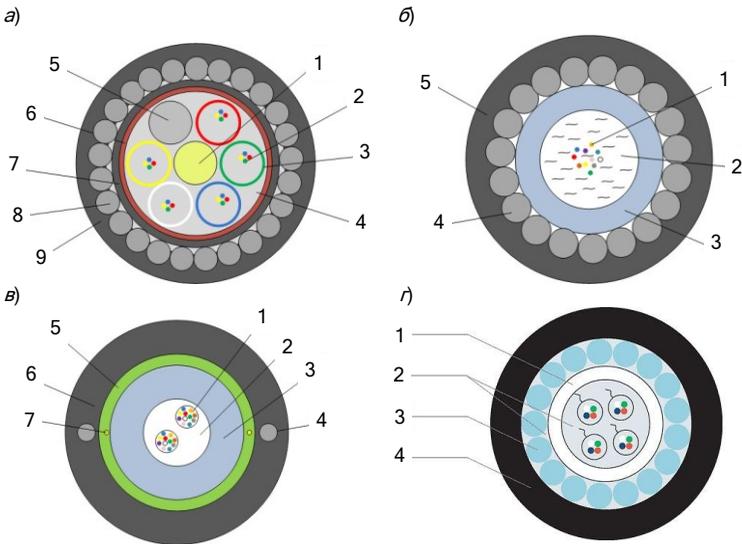


Рисунок 6.2 – Волоконно-оптические кабели для прокладки непосредственно в грунт

Структура кабеля ОКТК (рисунок 6.2, б):

- 1 – оптические волокна;
- 2 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 3 – центрально-расположенная трубка;
- 4 – броня из круглых стальных оцинкованных проволок;
- 5 – защитный шланг из полиэтилена.

Структура кабеля ОКТБг (рисунок 6.2, в):

- 1 – оптические волокна, сгруппированные в пучки;

- 2 – тиксотропный гидрофобный наполнитель;
- 3 – центрально-расположенная трубка;
- 4 – силовой элемент (продольно расположенные стальные проволоки);
- 5 – броня из гофрированной стальной ламинированной ленты;
- 6 – защитный шланг из полиэтилена;
- 7 – шнур режущий.

Кабель ОПС предназначен для прокладки в грунтах всех групп в открытую траншею, групп 1–3 – при прокладке ножевым кабелеукладчиком (кроме грунтов подверженным мерзлотным деформациям), а также в кабельной канализации, блоках, по мостам и эстакадам при особо высоких требованиях по механической устойчивости, в тоннелях и коллекторах (при наличии специальных требований по стойкости к медленной электросвязи кабель изготавливается с внешней оболочкой из дугостойкого материала). Кабель этого типа может содержать от 2 до 48 волокон.

Структура кабеля ОПС (рисунок 6.2, з):

- 1 – осевой элемент (центральная трубка с гидрофобным наполнителем и оптическими волокнами, сгруппированными в пучки или уложенными свободно);
- 2 – межмодульный гидрофобный наполнитель;
- 3 – броня из круглых стальных проволок;
- 4 – защитная оболочка (полиэтилен или материал, не распространяющий горение).

При строительстве и реконструкции устройств автоматики, телемеханики и связи на малодеятельных участках железных дорог с тепловозной и электрической тягой применяется комбинированный кабель с оптическими волокнами и медными жилами МКПВБАШп.

6.3 Типы оптических волокон

Многомодовые волокна. Если диаметр сердечника много больше длины волны оптической несущей, то импульс света, распространяющийся в нем, состоит из многих составляющих, направляемых в отдельных модах ОВ. Каждая мода возбуждается на входе световода под своим определенным углом ввода и направляется по сердечнику по своей траектории. Такой тип ОВ называется многомодовым (Multi Mode Fiber, MMF). Моды проходят разные расстояния оптического пути и поэтому приходят на выход ОВ в разное время.

Многомодовые ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления характеризуются искажениями, которые обусловлены дисперсией времени задержки отдельных мод, в результате чего, по мере прохождения по ОВ короткий световой импульс уширяется во времени. Это является недостатком для оптических систем передачи информации, так как уменьшает скорость передачи и полосу пропускания.

В многомодовых ОВ с градиентным профилем показателя преломления лучи света проходят по винтообразным спиральным траекториям. Они распространяются незигзагообразно. Вследствие непрерывного изменения показателя преломления $n(r)$ в стекле сердечника лучи непрерывно преломляются, и поэтому их направление распространения меняется, за счет чего они распространяются по волновым траекториям. Лучи, колеблющиеся вокруг оси световода, проходят более длинный путь, чем лучи света вдоль оси световода. Однако благодаря меньшему показателю преломления в отдалении от оси ОВ эти лучи распространяются соответственно быстрее, благодаря чему более длинные оптические пути компенсируются меньшим временем прохождения. В результате различие временных задержек разных лучей почти полностью исчезает.

Большое распространение получили одномодовые ОВ с треугольным и W -образным профилем показателя преломления. Применение сложных профилей показателя преломления обусловлено стремлением оптимизировать работу ОВ в определенных диапазонах длин волн.

Одномодовые волокна. Искажений, которые характерны для многомодовых ОВ, можно избежать, если подобрать структурные параметры ОВ таким образом, чтобы в нем распространялась одна единственная – основная мода. Такие волокна называются одномодовыми (Single Mode Fiber, SMF).

Межмодовая дисперсия в одномодовом ОВ отсутствует. Однако основная мода также уширяется во времени по мере прохождения по такому световоду. Уширение вызвано некогерентностью источников излучения, реально работающих в спектре длин волн $\Delta\lambda$. Отличие времени распространения каждой из направляемых мод, образующих сигнал, от частоты спектра источника оптического излучения приводит к возникновению так называемой хроматической дисперсии.

При стыковке одномодовых ОВ между собой важную роль играет диаметр модового поля. В многомодовых ОВ размер сердцевинны

принято оценивать диаметром, в одномодовых волокнах применяется понятие диаметра модового поля. Это связано с тем, что энергия основной моды в ОВ распространяется не только в сердцевине, но и частично в оболочке, захватывая ее приграничную область. Поэтому диаметр модового поля более точно оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды.

Одномодовые волокна со смещенной дисперсией. Для кварцевых ОВ минимум затухания соответствует длине волны 1,55 мкм, но при скоростях передачи порядка нескольких Гбит/с дальность связи на этой длине волны может ограничиваться хроматической дисперсией, поэтому для ее снижения осуществляется выбор соответствующего профиля показателя преломления.

Стандартное одномодовое ОВ не обеспечивает малой дисперсии для длины волны 1,55 мкм, поэтому были разработаны ОВ со смещенной дисперсией (Dispersion-Shifted Fiber, DSF), которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления.

Основой для создания ОВ со смещенной дисперсией является ее отрицательная волноводная дисперсия (рисунок 6.3). Делая волноводную дисперсию большой и отрицательной, можно скомпенсировать материальную дисперсию и сдвинуть нулевую дисперсию в длинноволновую область (рисунок 6.4). Сдвиг достигается уменьшением диаметра сердечника ОВ, увеличением оптической разности показателя преломления и конфигурацией профиля показателя преломления.

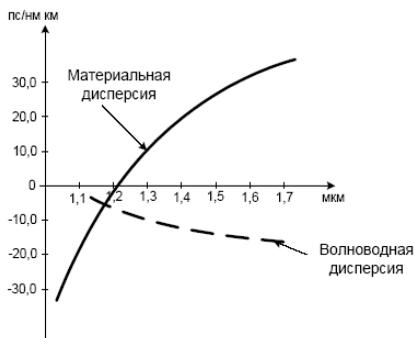


Рисунок 6.3 – Зависимость различных видов дисперсии от длины волны

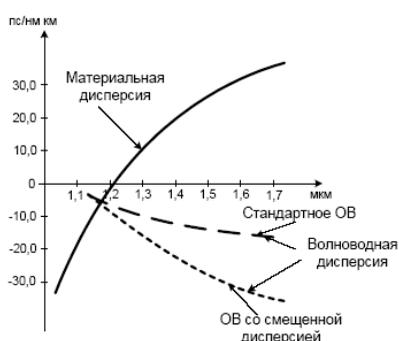


Рисунок 6.4 – Отличие волноводной дисперсии в стандартном ОВ и в ОВ со смещенной дисперсией

В результате исследований ОВ со смещенной дисперсией было показано, что наилучшие показатели обеспечивают волокна с треугольным профилем, так как они обладают самофокусирующими свойствами и удерживают распространяющиеся лучи в небольшом объеме, прилегающем к оси ОВ. Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения одномодовых ОВ показана на графике (рисунок 6.5).

Из графика видно, что хроматическая дисперсия у стандартного ОВ на длине волны 1550 нм составляет около 18 пс/(нм·км). Оптические потери у одномодовых волокон на длине волны 1550 нм приблизительно в два раза меньше, чем потери на длине волны 1310 нм. Сдвиг длины волны нулевой дисперсии на длину волны 1550 нм позволяет извлечь выгоду из этих малых оптических потерь и получить при этом меньшие искажения импульсов.

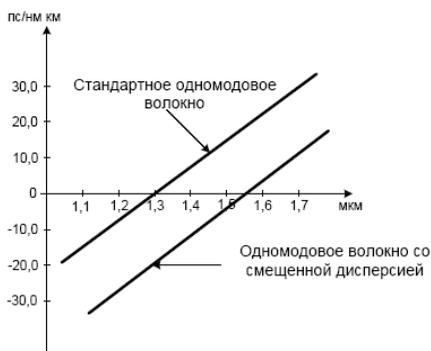


Рисунок 6.5 – Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения одномодовых ОВ

Одномодовые волокна с минимизацией затухания (Conventional Single-mode Fiber, CSF). Они имеют нулевую дисперсию при длине волны около 1300 нм с минимальным уровнем потерь. При длине волны около 1550 нм данное одномодовое оптическое волокно имеет смещенную дисперсию и отсечку. Оно оптимизировано для использования в диапазоне длин волн 1530–1625 нм. Одномодовое волокно с минимизацией затухания, имеющее очень малые потери, может использоваться в приложениях для цифровой передачи на большие расстояния, таких как наземные системы дальней связи и магистральные подводные кабели с оптическими усилителями.

Одномодовые волокна с ненулевой смещенной дисперсией. В системах с волновым (спектральным) уплотнением (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) и с оптическим усилением компенсация дисперсии представляет более сложную задачу, так как мощность оптических усилителей достаточна для того, чтобы создавать нелинейные эффекты в одномодовом ОВ. Использование одномодо-

вых ОВ со смещенной дисперсией решает проблемы, связанные с хроматической дисперсией на длине волны 1550 нм, однако оно не подходит для использования в DWDM-системах из-за ряда нелинейных явлений. Поэтому второй целью компенсации хроматической дисперсии является ограничение искажений, вызываемых этими нелинейными явлениями. Снижение влияния нелинейных эффектов может быть достигнуто наличием в ОВ небольшого (ненулевого) уровня хроматической дисперсии. Поэтому было разработано одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZDSF).

Волокна NZDSF дают возможность работать в значительно более широком диапазоне длин волн благодаря тому, что в результате ряда усовершенствований кривая зависимости дисперсии от длины волны у этих волокон более гладкая и пологая. Гладкость и пологость этой кривой улучшают характеристики волокна благодаря тому, что исключается необходимость решения сложной проблемы компенсации дисперсии.

Характеристики описанных волокон приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Характеристики оптических волокон

Характеристики	Одномодовое волокно				Многомодовое волокно	
	стандартное SM	со смещённой дисперсией DSF	с минимизацией затухания CSF	с ненулевой смещённой дисперсией NZDSF	50 / 125	62,5 / 125
	ITU-T G. 652	ITU-T G. 653	ITU-T G. 654	ITU-T G. 655	ITU-T G. 651	IEC 60793-2
<i>Оптические</i>						
Затухание, дБ/км, при длине волны, нм:						
850	–	–	–	–	≤ 3,0	≤ 3,0
1300	–	–	–	–	≤ 1,0	≤ 1,0
1310	≤ 0,36	–	–	–	–	–
1550	≤ 0,22	≤ 0,35	≤ 0,22	≤ 0,35	–	–
Диаметр модового поля, мкм	9,3 ± 0,5 (на 1310 нм)	7,8 ± 0,8 (на 1550 нм)	10,0 ± 0,5 (на 1550 нм)	9,5 ± 0,5 (на 1550 нм)	–	–

Продолжение таблицы 6.1

Характеристики	Одномодовое волокно				Многомодовое волокно	
	стандартное SM	со смещённой дисперсией DSF	с минимизацией затухания CSF	с ненулевой смещённой дисперсией NZDSF	50 / 125	62,5 / 125
	ITU-T G. 652	ITU-T G. 653	ITU-T G. 654	ITU-T G. 655	ITU-T G. 651	IEC 60793-2
Полоса пропускания, МГц·км: $\lambda = 850$ нм $\lambda = 1300$ нм	– –	– –	– –	– –	≥ 250 ≥ 500	≥ 200 ≥ 400
Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км): 1285–1330 нм 1550 нм 1530–1565 нм 1525–1575 нм	$\leq 3,5$ ≤ 18 – –	– – – $\leq 3,5$	– – – –	– – 1,0–6,0 –	– – – –	– – – –
Диапазон длин волн при нулевом значении дисперсии, нм	1300–1325	1525–1575	1260–1300	–	–	–
Максимальный наклон дисперсионной кривой в точке её нулевого значения, пс/(нм ² ·км)	$\leq 0,092$	$\leq 0,085$	$\leq 0,095$	–	–	–
Поляризационная модовая дисперсия (ПМД) 1550 нм, пс·км ^{1/2}	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	–	–
Числовая апертура (NA)	–	–	–	–	$0,21 \pm 0,02$	$0,275 \pm 0,015$

Продолжение таблицы 6.1

Характеристики	Одномодовое волокно				Многомодовое волокно	
	стандартное SM	со смещённой дисперсией DSF	с минимизацией затухания CSF	с ненулевой смещённой дисперсией NZDSF	50 / 125	62,5 / 125
	ITU-T G. 652	ITU-T G. 653	ITU-T G. 654	ITU-T G. 655	ITU-T G. 651	IEC 60793-2
<i>Геометрические</i>						
Некруглость сердцевины, %	–	–	–	–	≤ 6	≤ 6
Диаметр сердцевины, мкм	–	–	–	–	50 ± 3	62,5 ± 3
Диаметр оболочки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 3	125 ± 2
Некруглость оболочки, %	≤ 1,0 %	≤ 2,0 %	≤ 2,0 %	≤ 1,0 %	≤ 1,0 %	≤ 2,0 %
Диаметр покрытия, мкм	245±10					
Неконцентричность, мкм: - сердцевина/оболочка - модовое поле/оболочка	– ≤ 0,5	– ≤ 1,0	– ≤ 0,8	– ≤ 0,6	≤ 1,5 –	≤ 1,5 –
<i>Воздействие окружающей среды</i>						
Зависимость затухания в диапазоне температуры (–60...+85) °С, дБ/км, при длине волны, нм:						
850	–	–	–	–	≤ 0,2	≤ 0,2
1300	–	–	–	–	≤ 0,2	≤ 0,2
1310	≤ 0,05	≤ 0,05	–	–	–	–
1550	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	–	–

Окончание таблицы 6.1

Характеристики	Одномодовое волокно				Многомодовое волокно	
	стандартное SM	со смещённой дисперсией DSF	с минимизацией затухания CSF	с ненулевой смещённой дисперсией NZDSF	50 / 125	62,5 / 125
	ITU-T G. 652	ITU-T G. 653	ITU-T G. 654	ITU-T G. 655	ITU-T G. 651	IEC 60793-2
<i>Механические</i>						
Испытание прочности	$\geq 1,0 \%$ (0,7ГПа)					
Радиус собственного изгиба, м	$\geq 4,0$				–	

Из таблицы 6.1 видно, что при использовании технологии СЦИ/SDH целесообразно применять стандартные одномодовые волокна (передача оптического сигнала на длине волны 1310 или 1550 нм) или одномодовые волокна со смещенной дисперсией (передача оптического сигнала в диапазоне длин волн 1525–1575 нм). Например, мультиплексоры Siemens SURPASS hit 7070 и SL64 при организации дальней связи, согласно техническим характеристикам, могут использовать указанные выше типы оптических волокон, но с передачей оптического сигнала только с длинами волн третьего окна прозрачности. Мультиплексоры Siemens SMA 16/4 и SMA 4/1 могут передавать оптические сигналы как на длине волны 1310 нм, так и на длине волны 1550 нм.

Для технологии WDM целесообразно применять одномодовые волокна со смещенной дисперсией или с минимизацией затухания (передача оптического сигнала с длинами волн из третьего окна прозрачности).

Для технологии DWDM целесообразно применять одномодовые волокна со смещенной дисперсией или с ненулевой смещенной дисперсией (передача оптического сигнала с длинами волн из третьего окна прозрачности).

7 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

7.1 Расчет длины усилительного участка

Для компенсации затухания оптического сигнала по мере его прохождения по линии связи чаще всего используют оптические усилители на волокне, легированном эрбием. Данный вид усилителей имеет ряд преимуществ, которые обусловили их широкое распространение в последнее время. Во-первых, для работы данного класса усилителей не требуется подстройка под частоту передаваемого сигнала. Во-вторых, усиление ведется в довольно широкой полосе частот. Эти преимущества позволяют легко наращивать емкость сети, не изменяя оборудования линий связи. В-третьих, для усиления сигнала не требуется его преобразования в электрическую форму. Также оптические усилители работают с сигналами любой формы и назначения. Эти преимущества делают их просто незаменимыми для работы совместно с системами WDM. Но наряду со своими преимуществами оптические усилители имеют ряд особенностей, которые необходимо обязательно учитывать при проектировании волоконно-оптических линий связи.

Помимо затухания, вносимого оптическим волокном, его также вносят разъемные и неразъемные соединения волокна. Поэтому необходимо учесть потери мощности сигнала при его вводе в волокно и обеспечить определенный технологический запас мощности.

Суммарные потери участка линейного тракта можно определить по формуле

$$A_{\Sigma}(L_y) = n_p \alpha_p + n_n(L_y) \alpha_n + A_{\text{зап}} + \alpha_{\text{км}} L_y + \alpha_{\text{вв}}, \quad (7.1)$$

где n_p – количество разъемных соединений в линейном тракте;

α_p – затухание в разъемных соединениях, дБ;

n_n – количество неразъемных соединений, которое связано с протяженностью участка усиления и строительной длиной оптического волокна,

$$n_n(L_y) = \frac{L_y}{L_{\text{стр}}} - 1; \quad (7.2)$$

- L_y – длина участка усиления, км;
 α_n – затухание в неразъемном (сварном) соединении, дБ;
 $A_{\text{зап}}$ – энергетический запас на старение элементов оптического тракта: источника излучения, волоконно-оптического кабеля, оптоэлектронного преобразователя, уход параметров электрических схем, дБ;
 $\alpha_{\text{км}}$ – километрическое затухание оптического кабеля, дБ/км;
 $\alpha_{\text{вв}}$ – потери при вводе оптической энергии в волокно, когда источник оптического излучения непосредственно подсоединяется к станционному кабелю, дБ.

Протяженность участка усиления L_y находится из следующего выражения:

$$p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}} = A_{\Sigma}(L_y), \quad (7.3)$$

где $p_{\text{пер}}$ – уровень сигнала на передающей стороне;

$p_{\text{пр}}$ – требуемый уровень сигнала на приемной стороне.

Окончательная формула для расчета участка усиления имеет следующий вид:

$$L_y = \frac{p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}} - n_p \alpha_p - A_{\text{зап}} - \alpha_{\text{вв}} + \alpha_n}{\alpha_{\text{км}} + \alpha_n / L_{\text{стр}}}. \quad (7.4)$$

Примем: $n_p = 2$; $\alpha_p = 0,4$ дБ; $\alpha_n = 0,05$ дБ; $\alpha_{\text{вв}} = 2$ дБ; $A_{\text{зап}} = 3$ дБ; $p_{\text{пер}} = 7$ дБ; $p_{\text{пр}} = -13$ дБ.

Расчитанная таким образом длина усилительного участка справедлива для обоих направлений передачи информации, если используется одинаковой оборудование с одинаковыми уровнями сигнала.

7.2 Расчет длины регенерационного участка

Расчет мощности шума, вносимого усилителем. Используемые оптические усилители имеют ряд отличительных особенностей. Одна из них состоит в том, что в отсутствии входного сигнала усилитель является источником спонтанного излучения фотонов. Спектр излучения зависит от формы энергетической зоны атомов эрбия и от статистического распределения заселенностей уровней зоны. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне

усилителя EDFA, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется усиленным спонтанным излучением (ASE – amplified spontaneous emission). Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается сигнал от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает происходить под действием сигнала от лазера, усиливая входной сигнал. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE. Но, несмотря на это, необходимо все же учитывать шумы, вносимые оптическими усилителями. Накопленный шум влияет на качество передаваемого сигнала, и в случае уменьшения величины отношения сигнала к шуму (ОСШ) ниже требуемого уровня необходима регенерация сигнала. Потому следует рассчитать максимально возможное количество усилителей оптического сигнала, расположенное между регенераторами.

Мощность усиленного одним оптическим усилителем спонтанного излучения можно найти по формуле

$$ASE = hv \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (7.5)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²;
 v – частота в соответствии с используемой длиной волны, Гц;
 n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, $n_{sp} = 2$, поскольку распространяются две моды поляризации;
 η – квантовая эффективность, $\eta = 1$;
 G – коэффициент усиления усилителя, (в абсолютных единицах измерения). Примем: $G = 100$ ($7 - -13 = 20$ дБ по напряжению).

Мощность шума усилителя для полосы частот, в которой осуществляется передача сигнала (Δf)

$$P_{ш_ASE} = ASE \cdot \Delta f. \quad (7.6)$$

Примем: $\Delta f = 100$ ГГц (STM-64), $\Delta f = 50$ ГГц (STM-16).

Располагая вычисленными характеристиками шума, вносимого оптическим усилителем, можно найти их максимально возможное количество, при которых сохраняется требуемое отношение сигнал – шум.

Расчет отношения сигнал – шум. При передаче сигнала по волоконно-оптической линии с усилителями EDFA происходит накопление шумов. Данное явление обусловлено двумя факторами: усилением входного шума и добавлением к нему усиленного спонтанного излучения. Входным шумом для первого оптического усилителя является мощность шума нулевых флуктуаций, которой можно пренебречь.

Для нахождения отношения сигнал-шум на выходе k -го усилителя используется формула

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{Ш}_\text{ВЫХ}_k}} \right). \quad (7.7)$$

Начальная мощность шума на входе первого усилителя пренебрежительно мала. Потому можно считать $P_{\text{Ш}_\text{ВЫХ}_0} = 0$. С учетом этого мощность шума на выходе k -го усилителя

$$P_{\text{Ш}_\text{ВЫХ}_k} = kP_{\text{Ш}_\text{ASE}}. \quad (7.8)$$

Подставив выражение (7.8) в (7.7), получаем

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с}_\text{ВЫХ}}}{kP_{\text{Ш}_\text{ASE}}} \right). \quad (7.9)$$

Для нахождения ОСШ в децибелах формулу (7.9) можно записать в виде

$$\text{ОСШ}_k = p_{\text{с}_\text{ВЫХ}} - p_{\text{Ш}_\text{ASE}} - 10 \cdot \log(k), \quad (7.10)$$

где $p_{\text{с}_\text{ВЫХ}}$ – уровень сигнала на выходе оптического усилителя, дБм;

$p_{\text{Ш}_\text{ASE}}$ – уровень шума вносимого оптическим усилителем, дБм.

По формуле (7.10) можно рассчитать отношение сигнал – шум на выходе оптической линии, содержащей несколько оптических усилителей и представить их в виде графика на рисунке 7.1.

Помимо этого, на графике показаны уровни сигнала и шума после прохождения нескольких оптических усилителей, а также требуемое ОСШ в 25 дБ. Эти результаты справедливы для двух направлений передачи информации. Видно, что с увеличением количества оптических усилителей возрастает уровень накопленного шума в линии. Это ведет к уменьшению отношения сигнал – шум. На примере требуемое ОСШ

сохраняется на выходе линии с использованием 12 оптических усилителей. Далее необходима регенерация сигнала, поскольку уровень накопленного шума достаточно высок. Его большее увеличение приведет к снижению качества передаваемой информации.

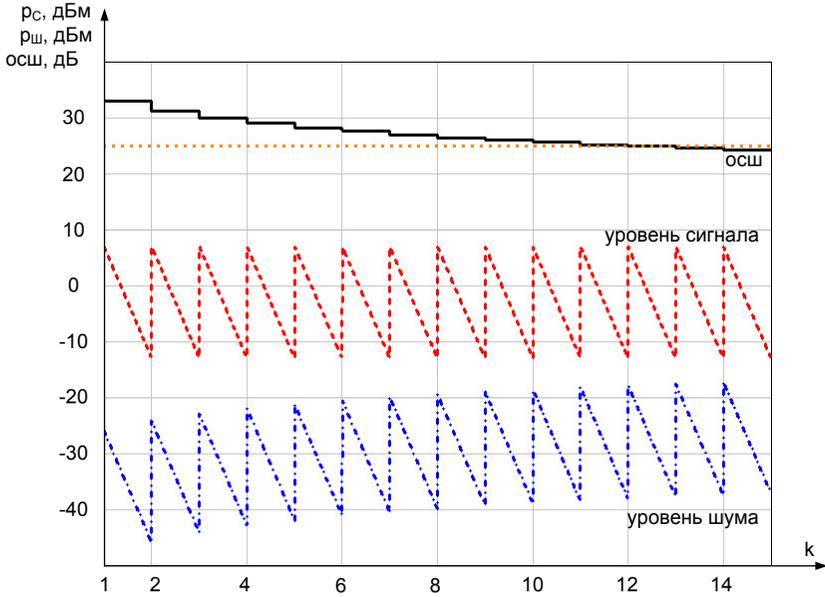


Рисунок 7.1 – ОСШ линии связи с несколькими оптическими усилителями

Регенератор состоит из оптического демультиплексора, оптического мультиплексора и нескольких регенераторов для каждого канала. В качестве мультиплексора и демультиплексора регенератора используются такие же модули, что и в окончательном оборудовании.

Регенерационный участок линии связи состоит из последовательно установленных оптического мультиплексора, оптических усилителей и оптического демультиплексора. Для примера, представленного на рисунке 7.1, длина регенерационного участка определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{рг}} = 12L_y. \quad (7.11)$$

На выходе 12-го усилителя отношение сигнал – шум ниже допустимого уровня, поэтому вместо 12-го усилителя необходимо устанавливать регенератор. И максимальное расстояние от аппаратуры

передачи до регенератора или от одного регенератора до другого составит 12 усилительных участков. Если по расчетам на линии связи необходимо установить один или несколько регенераторов, то целесообразно размещать их равномерно вдоль линии. Например, если длина регенерационного участка равна 12 усилительным, а линия связи включает 17 усилителей, то регенератор необходимо установить вместо 9-го усилителя, а не вместо 12-го.

7.3 Расчет хроматической дисперсии оптического волокна

Дисперсия – это явление уширения импульсов при передаче по оптическому волокну. Она имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины L :

$$\tau(L) = \sqrt{\tau_{\text{вых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}. \quad (7.12)$$

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/(нм·км). В одномодовом волокне на распространение сигнала оказывают влияние как хроматическая, так и поляризационно-модовая дисперсия. Хроматическая дисперсия, в свою очередь, имеет две составляющие: материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

Удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле

$$\sigma_H = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (7.13)$$

где S_0 – наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии, пс/(нм²·км);

λ – рабочая длина волны, нм;

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Примем следующие значения, полученные аналитическим путем согласно положениям стандартов ITU-T G.652–655 (см. таблицу 6.1), для длины волны нулевой дисперсии (λ_0) и наклона дисперсионной кривой на длине волны нулевой дисперсии (S_0):

– для стандартного одномодового волокна (SM) – $S_0 = 0,078$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1325$ нм;

- для одномодового волокна со смещенной дисперсией (DSF) – $S_0 = 0,054$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1575$ нм;
- для одномодового волокна с минимизацией затухания (CSF) – $S_0 = 0,095$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1300$ нм;
- для одномодового волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) – $S_0 = 0,15$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1525$ нм.

Как видно из формулы (13), для различных длин волн при спектральном уплотнении сигнала будут различными значения удельной хроматической дисперсии. Поэтому необходимо рассчитывать удельную дисперсию для каждой длины волны.

Хроматическая дисперсия волокна рассчитывается по формуле

$$\tau_{chr} = \sigma_n L, \quad (7.14)$$

где σ_n – рассчитанная выше удельная хроматическая дисперсия;

L – длина волоконно-оптической линии.

Допустимые значения хроматической дисперсии для различных мультиплексоров представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Допустимые значения хроматической дисперсии для различных мультиплексоров

Тип мультиплексора	Допустимое хроматическая дисперсия, пс/нм	
	на длине волны 1310 нм	на длине волны 1550 нм
Siemens SMA 4/1	≤ 130	≤ 2500
Siemens SMA 16/4	≤ 300	≤ 1800
Siemens SL 64:		
– ОВ типа SM	–	≤ 1600
– ОВ типа DSF	–	≤ 260
– ОВ типа NZDSF	–	≤ 480
Siemens SURPASS hit 7070:		
– ОВ типа SM	–	≤ 1600
– ОВ типа DSF	–	Любое значение дисперсии необходимо компенсировать
Siemens SURPASS hit 7550	–	

Необходимо свести хроматическую дисперсию к минимуму и этим обеспечить необходимый технологический запас на старение волокна.

Наиболее распространены два способа борьбы с дисперсией. Первый из них – это регенерация оптического сигнала, осуществляемая путем преобразования сигнала в электрическую форму, его регенерации и обратного преобразования в оптическую форму. Для группового DWDM сигнала необходимо демультиплексировать сигнал на

отдельные каналы и установить на каждый канал отдельный регенератор. После регенерации необходимо снова провести мультиплексирование всех передаваемых длин волн. Очевидно, что использование подобных регенераторов выгодно только в точке приема передаваемого сигнала. Использование таких регенераторов для компенсации дисперсии экономически не выгодно.

Второй способ борьбы с дисперсией не предусматривает преобразования в электрическую форму. Для компенсации дисперсии используются волокна, имеющие отрицательное значение хроматической дисперсии. Модуль удельной дисперсии такого волокна намного больше, чем у стандартного одномодового. Потому для компенсации дисперсии требуется намного меньший отрезок волокна, чем длина участка линии связи. Компенсация дисперсии производится путем вставки в кабель модуля с волокном компенсации дисперсии. Модули компенсации дисперсии (DCM) поставляются вместе с оборудованием. Использование такого метода не требует демультиплексирования составного оптического сигнала. Также следует отметить, что данный метод борьбы с дисперсией не накладывает никаких ограничений на скорость и форму передаваемого сигнала.

Для компенсации хроматической дисперсии используют волокно со следующими параметрами: $S_0 = 0,75$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1750$ нм.

Используя (7.13) и (7.14) найдем длину волокна, необходимую для компенсации хроматической дисперсии всей линии связи:

$$L_{DCF} = \frac{-\tau_{chr}}{\frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]}. \quad (7.15)$$

Оптимальным будет установка нескольких модулей компенсации, которые включаются между каскадами оптических усилителей платы оптического интерфейса. Так, минимизируется влияние затухания волокна компенсации дисперсии на передаваемый сигнал. Два модуля DCM можно установить на оконечных пунктах волоконно-оптической линии, а остальные – совместно с оптическими усилителями. Хроматическая дисперсия одного такого модуля составляет

$$\tau_{DCM} = L_{DCF} \cdot \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]. \quad (7.16)$$

Различные длины волн передаваемого сигнала имеют разное значение хроматической дисперсии и в оптическом волокне, и в модулях компенсации дисперсии. Потому на приемной стороне существует определенный разброс значений дисперсии для составного сигнала систем DWDM, как показано на рисунке 7.2.

После прохождения составным сигналом волоконно-оптической линии и четырех модулей DCM остаточная дисперсия имеет значение

$$\tau_{rez} = \tau_{chr} + n\tau_{DCM}, \quad (7.17)$$

где n – число модулей DCM.

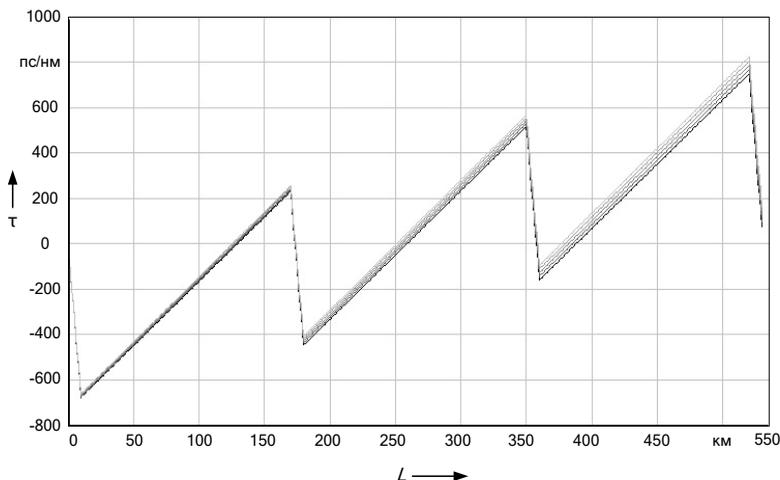


Рисунок 7.2 – Хроматическая дисперсия составного сигнала DWDM

8 РАССТАНОВКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ

Для расстановки усилителей необходимо найти общее количество усилительных участков:

$$N = \frac{L}{L_y}. \quad (8.1)$$

Для двух направлений передачи сигнала целесообразно устанавливать усилители в одном и том же месте и на одинаковом расстоянии, обеспечивая тем самым одинаковые параметры передаваемых сигналов.

Результаты расчетов количества усилительных и регенерационных участков, а также значений хроматической дисперсии и длины компенсационного волокна для всех участков целесообразно свести в общую таблицу, характеризующую первичную сеть железной дороги в целом. В таблице 8.1 представлены характеристики нескольких участков при следующих условиях:

- длина усилительного участка – 50 км;
- длина регенерационного участка – 400 км;
- на дорожном уровне сети используются мультиплексоры Siemens SURPASS hit 7070 с передачей сигналов по стандартным одномодовым волокнам;
- на отделенческом уровне сети используются мультиплексоры Siemens SMA 4/1 с передачей сигналов по стандартным одномодовым волокнам на длине волны 1550 нм.

Таблица 8.1 – Характеристика участков первичной сети железной дороги

Характеристика участка	Участок первичной сети железной дороги									
	ОУ1–ОУ2	ОУ2–ОУ3	ОУ3–ОУ1		ОУ1–Ст.1	Ст.1–ОУ3	ОУ1–Ст.2	Ст.2–ОУ2	ОУ2–Ст.3	Ст.3–ОУ3
			ОУ3–Пер*	Пер.–ОУ1						
Расстояние, км	360	240	420		185	235	30	330	110	130
			235	185						
Количество усилителей	7	4	4	3	3	4	0	6	2	2
Количество регенераторов	0	0	1		0	0	0	0	0	0
Дисперсия, пс/нм	6451,2	4300,8	4211,2	3315,2	3315,2	4211,2	537,6	5913,6	1971,2	2329,6
Допустимая хроматическая дисперсия, пс/нм	1600	1600	1600	1600	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Длина компенсационного волокна, км	35,52	23,68	23,19	18,25	18,25	23,19	0	32,56	0	0
Количество участков компенсации	7	6**	3	3	3	3	0	4	0	0
Длина компенсационного волокна одного участка, км	5,07	3,95	7,73	6,08	6,08	7,73	0	8,14	0	0
* Участок, на котором расположен регенератор, разбивается на подучастки.										
** Компенсация волокна происходит как в усилителях, так и в аппаратуре передачи и приема.										

Пример зависимостей затухания оптического сигнала и его дисперсии от расстояния и мест расположения аппаратуры, согласно структурной схемы участка волоконно-оптической линии связи, изображен на рисунке 8.1. На схеме показан участок дорожной сети между ОУЗ и ОУ1 с расстановкой усилителей и одного регенератора. Усилители и оконечная аппаратура с установленными модулями компенсации дисперсии обозначены на рисунке знаком «τ». Расчет параметров участка ОУЗ – ОУ1, представленного на рисунке 8.1, полностью соответствует данным из таблицы 8.1 для данного участка. На рисунке приведены зависимости только для прямого направления передачи. Для обратного направления эти графики будут идентичны.

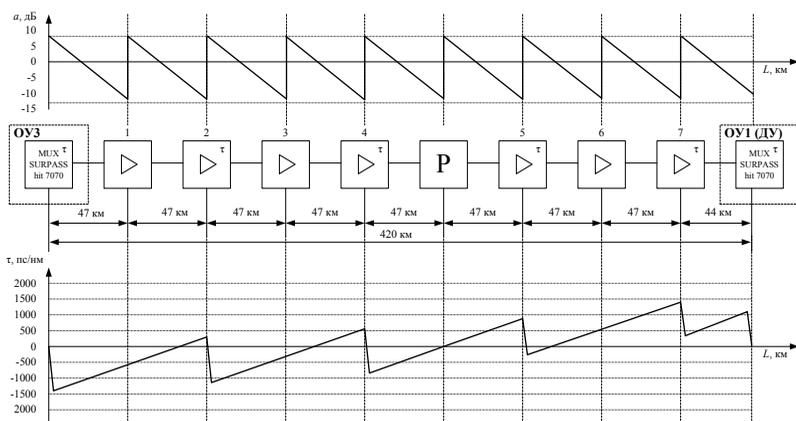


Рисунок 8.1 – Структурная схема участка волоконно-оптической линии связи

9 ОРГАНИЗАЦИЯ СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Схема организации связи на железной дороге должна содержать все отделения дороги и станции, линии связи между ними, усиленные и регенерационные пункты с указанием расстояний между ними, а также места компенсации дисперсии.

Для построения схем выбраны технология SDH для пространственного уплотнения оптических сигналов и комбинация технологий SDH и DWDM для спектрального уплотнения. Технология SDH на дорожном уровне представлена на схемах мультиплексором фирмы Siemens SURPASS hit 7070 (поток STM 64), а на дорожном уровне – мультиплексорами SMA 16/4 и SMA 4/1 (поток STM 16 и

STM 4 соответственно) той же фирмы. Технология DWDM представлена на схемах мультиплексором фирмы Siemens SURPASS hit 7550 (до 64 потоков STM 64).

На рисунках 9.1–9.3 представлены примеры реализации на структурной схеме организации связи на железной дороге топологий типа «кольцо» (рисунок 9.1), «плоское кольцо» на дорожном уровне (рисунок 9.2) и «плоское кольцо» на отделенческом уровне (рисунок 9.3).

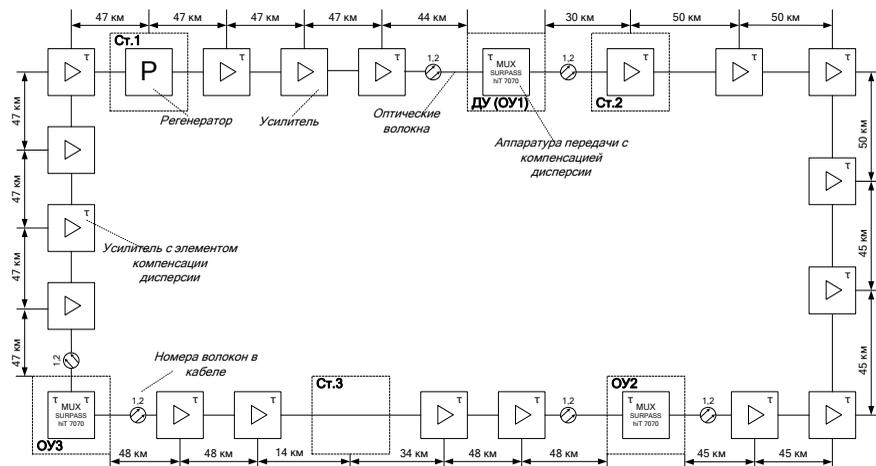


Рисунок 9.1 – Пример построения кольцевой топологии на дорожном уровне сети

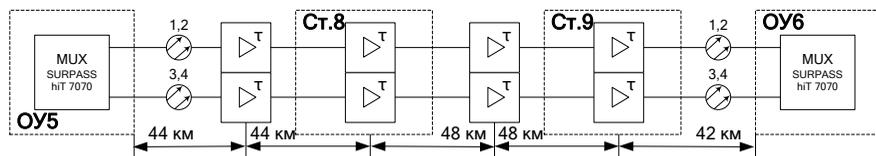


Рисунок 9.2 – Пример построения плоского кольца на дорожном уровне сети

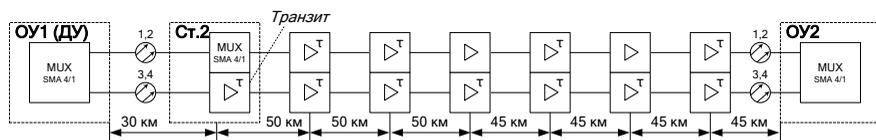


Рисунок 9.3 – Пример построения плоского кольца на отделенческом уровне сети

На рисунках 9.4–9.8 представлены примеры соединений между мультиплексорами в узлах сети при использовании различных типов топологии сети. На рисунке 9.4 приведена структурная схема узла сети, объединяющего два кольца, с пространственным уплотнением оптических сигналов. Здесь же показана аппаратура, организующая плоские кольца на отделенческом уровне. Допускается второй поток плоского кольца на отделенческом уровне направлять вместе с потоками дорожного уровня на том же участке (рисунок 9.5), однако в таком случае к количеству каналов дорожного уровня необходимо прибавить количество каналов отделенческого уровня на данном участке и по суммарному числу каналов выбирать пропускную способность сети передачи данных участка.

На рисунке 9.7 приведена структурная схема узла сети, объединяющего топологии кольцо и плоское кольцо на дорожном уровне, с пространственным уплотнением оптических сигналов. Рисунки 9.6 и 9.8 описывают те же условия организации сети, но с применением спектрального уплотнения оптических сигналов вместо пространственного.

На рисунках 9.9 и 9.10 приведены примеры построения структурной схемы сети из нескольких участков, объединенных общими узлами, при пространственном и спектральном способах уплотнения оптических сигналов соответственно.

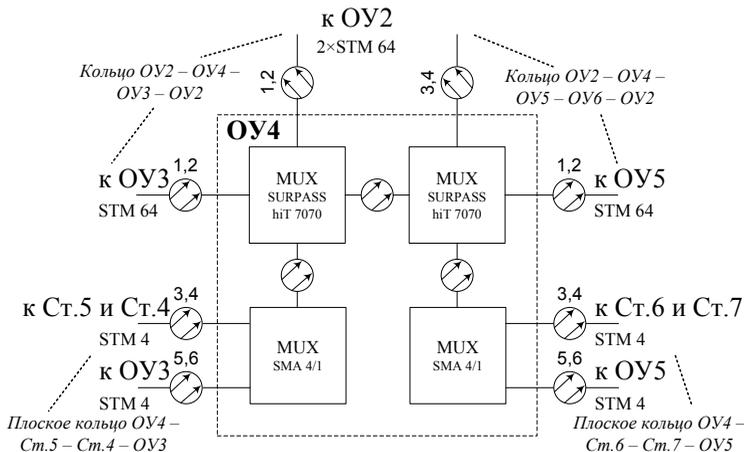


Рисунок 9.4 – Пример построения узла сети, объединяющего два кольца, с пространственным уплотнением оптических сигналов

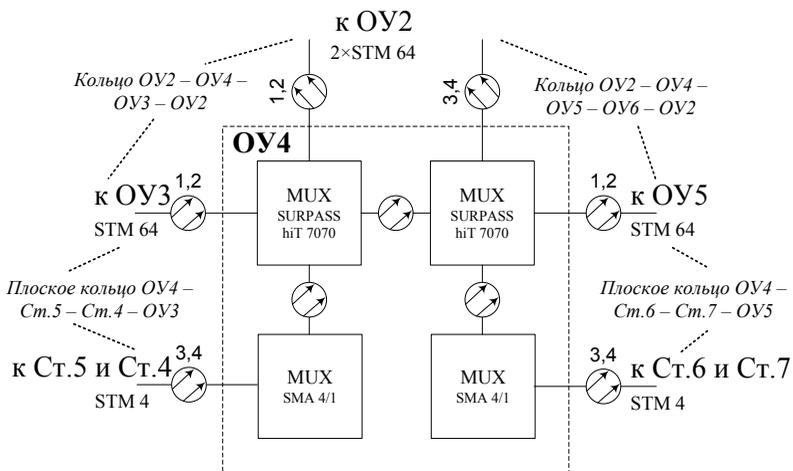


Рисунок 9.5 – Пример построения узла сети, объединяющего два кольца, с пространственным уплотнением оптических сигналов

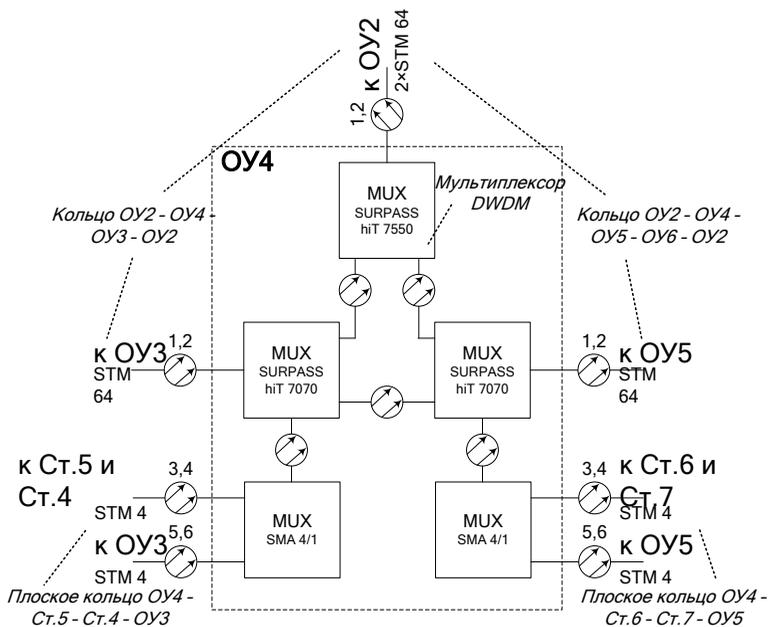


Рисунок 9.6 – Пример построения узла сети, объединяющего два кольца, со спектральным уплотнением оптических сигналов

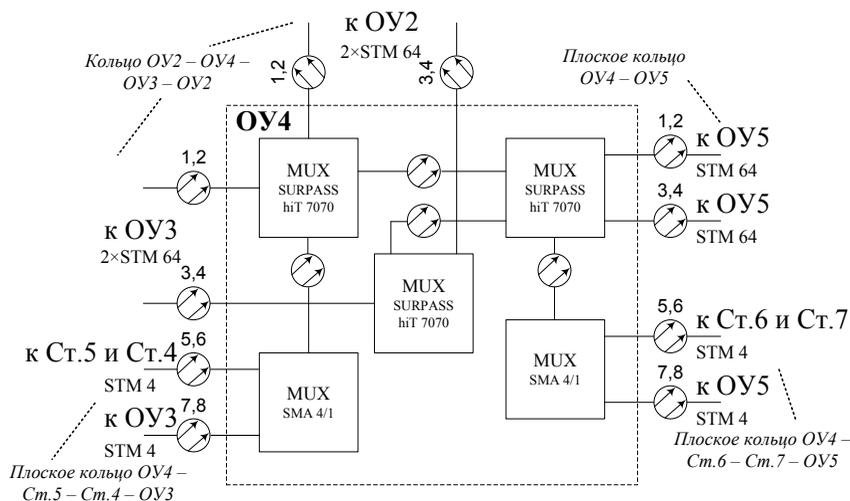


Рисунок 9.7 – Пример построения узла сети, объединяющего топологии кольцо и плоское кольцо на дорожном уровне, с пространственным уплотнением оптических сигналов

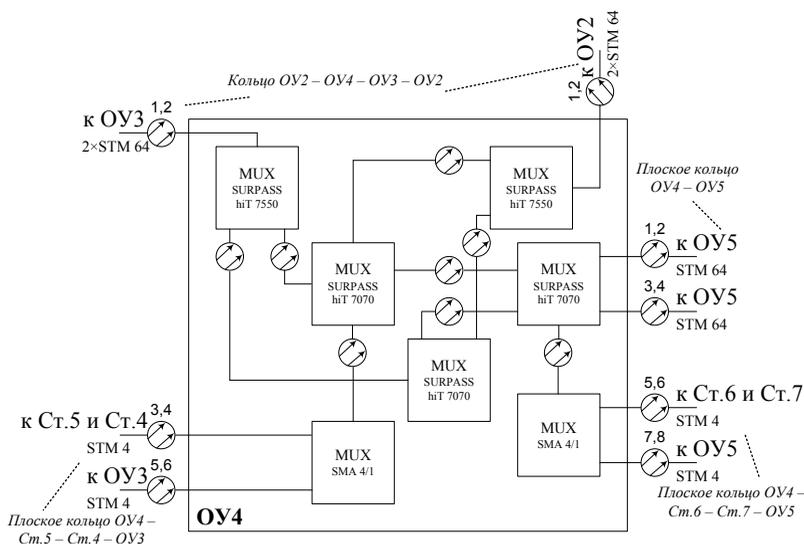


Рисунок 9.8 – Пример построения узла сети, объединяющего топологии кольцо и плоское кольцо на дорожном уровне, со спектральным уплотнением оптических сигналов

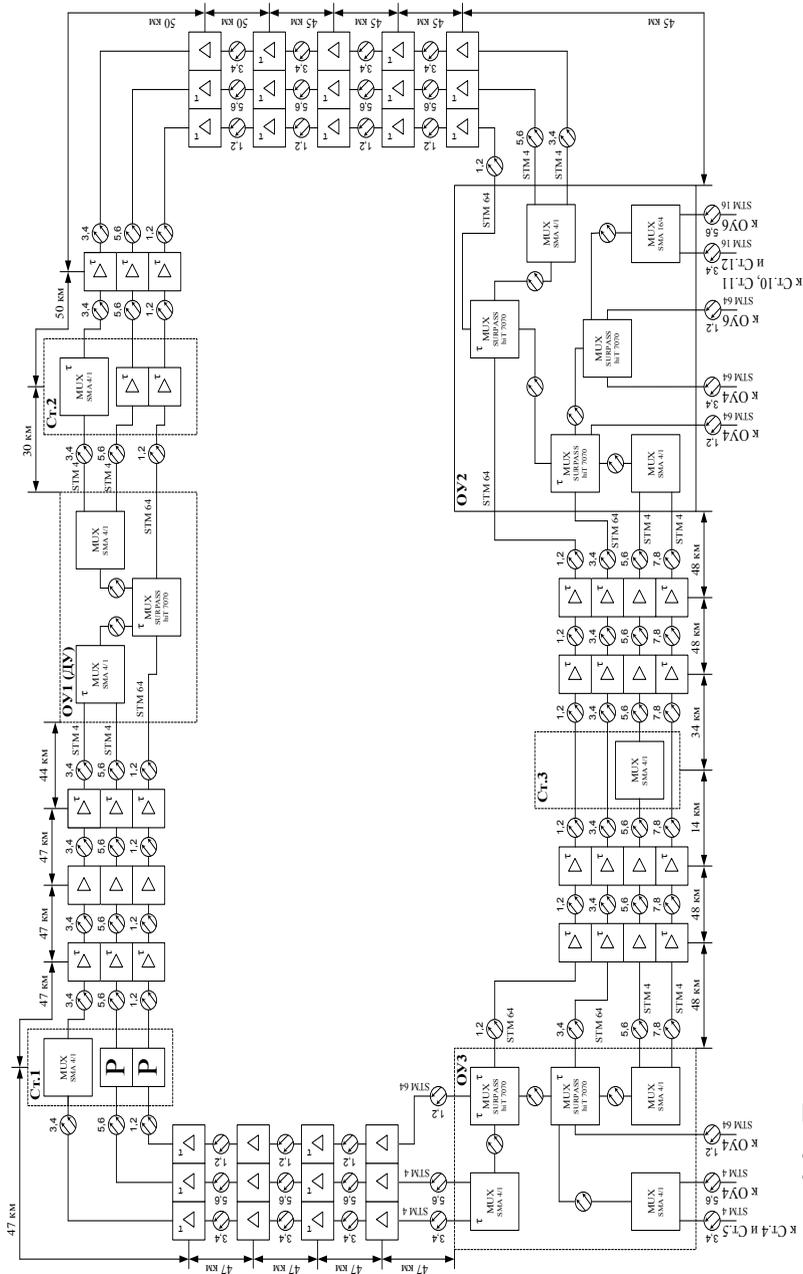


Рисунок 9.9 – Пример структурной схемы нескольких участков сети на дорожном и отделенческом уровнях с пространственным уплотнением оптических сигналов

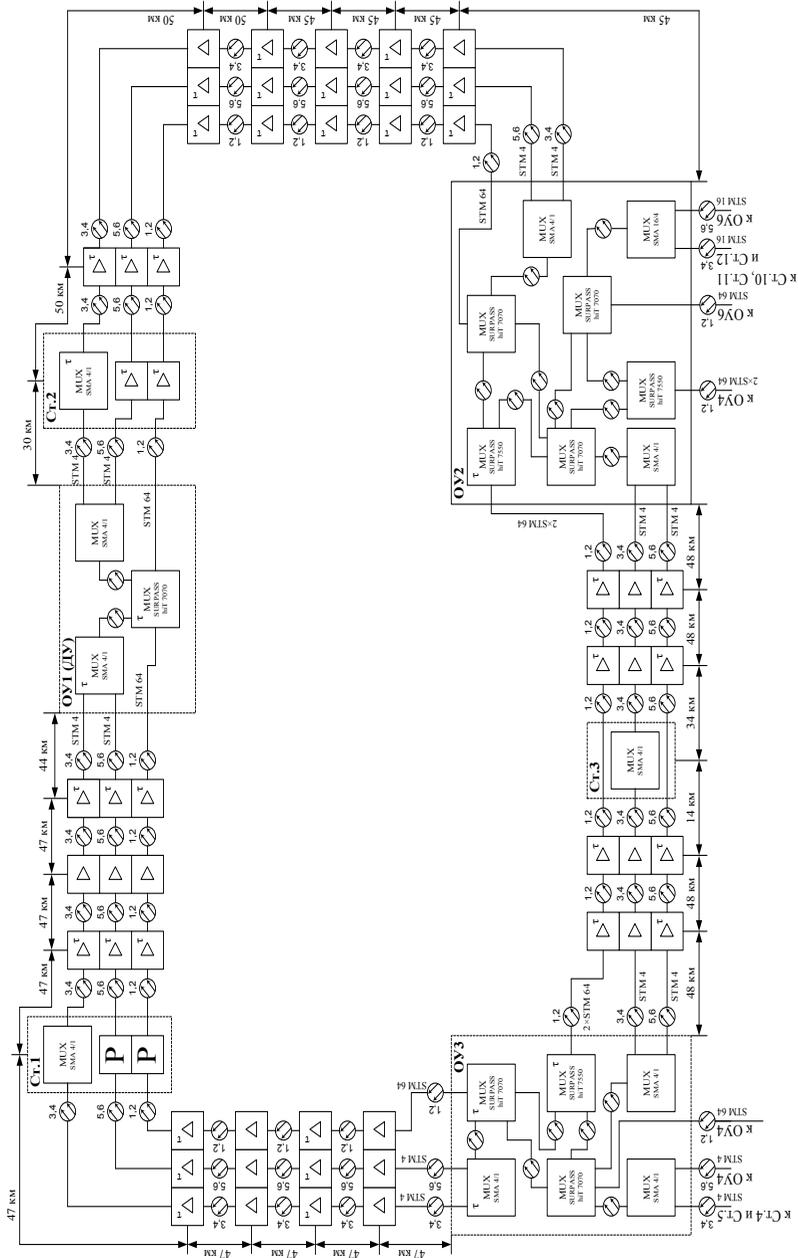


Рисунок 9.10 – Пример структурной схемы нескольких участков сети на дорожном и отделенческом уровнях со спектральным уплотнением оптических сигналов

10 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Решение проблем надежности и устойчивости сводится к созданию оптимальной системы технической эксплуатации, которая обеспечивает выполнение технико-экономических условий: устойчивого функционирования цифровой сети связи.

Техническое условие связано с обеспечением высоких, отвечающих международным требованиям, параметров надежности сети (ВОЛП) при установлении соединения между любой парой сетевых узлов (станций). Надёжность сети – одна из основных характеристик, определяющих качество работы сети, комплексным показателем которой является коэффициент готовности k_r (или значение коэффициента простоя $k_n = 1 - k_r$), а также сопутствующие ему показатели – среднее время наработки на отказ (t_o , ч) и среднее время восстановления (t_b , ч), затрачиваемое на обнаружение отказа, поиск его причин и устранение последствий:

$$k_r = \frac{t_o}{t_o + t_b}. \quad (10.1)$$

Расчет показателей надежности сети ведется с учетом особенностей конфигурации сети и исходных данных о надежности составных элементов оборудования. Необходимо учитывать, что резервирование и кольцевой принцип построения сетевых структур на порядок и больше снижает вероятность отказов при повреждениях кабеля, ретрансляционных и усилительных устройств.

Одним из основных параметров оценки надёжности линейно-кабельных сооружений ВОЛП является средняя интенсивность или плотность повреждений μ , приходящаяся на 100 км ВОЛП, которая рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{100N}{kL}. \quad (10.2)$$

где N – число отказов на линии передачи длиной L км за k лет.

Значение μ определяется отдельно для различных видов отказов, что удобно для анализа и оценки воздействия внешних и внутренних влияющих факторов на собственные характеристики надёжности

технических средств ВОЛП, построенных с подвеской кабеля на опорах контактной сети или высоковольтных линий автоблокировки, а также при непосредственной прокладке его в грунте или трубопроводе.

В свою очередь коэффициент готовности k_{r1} на 100 км линии определяется следующим соотношением:

$$k_{r1} = \frac{t_r - t_b \mu}{t_r}. \quad (10.3)$$

где t_r – число часов в году (8760);

t_b – среднее время восстановления, ч.

Отсюда при известных значениях коэффициента готовности k_r и интенсивности отказов μ среднее время восстановления t_b и наработки на отказ t_0 определяются следующими соотношениями:

$$t_b = \frac{t_r (1 - k_{r1})}{\mu}. \quad (10.4)$$

$$t_0 = \frac{t_b k_{r1}}{1 - k_{r1}}. \quad (10.5)$$

Коэффициент готовности, среднее время восстановления и другие показатели обычно нормируются. Так, Международный союз электросвязи (МСЭ-Т) рекомендует значение $k_r = 0,996$ для волоконно-оптической линии связи протяжённостью 2500 км (без резерва). Национальные стандарты развитых стран являются более жёсткими. Поэтому в руководящих технических материалах (РТМ) «Основные положения развития первичной сети связи Российской Федерации» (Москва, ЦНИИС, 1994) значение коэффициента готовности k_r для перспективной ВОЛС протяжённостью 13900 км (без резервирования) определён равным 0,985. Отсюда значение коэффициента готовности для линии связи протяжённостью 100 км составляет 0,99989. Это же значение k_r для линии 100 км может быть рекомендовано и для ВОЛП железнодорожного транспорта.

Применительно к ВОЛП показатели надежности и устойчивого функционирования, а также взаимосвязь между ними характеризуется коэффициентом готовности:

$$k_{\Gamma} = k_o k_{\text{пв}}^N k_{\text{гл}}^{L/100}, \quad (10.6)$$

где k_o – коэффициент готовности окончного оборудования;
 $k_{\text{пв}}$ – коэффициент готовности пунктов выделения каналов;
 N – количество пунктов выделения каналов;
 $k_{\text{гл}}$ – коэффициент готовности линейного тракта ВОЛП протяженностью 100 км;
 L – общая протяженность волоконно-оптической линии, км.

Среднее время простоя (недоступности) в течение года определяется коэффициентом

$$k_{\Pi} = 1 - k_{\Gamma}. \quad (10.7)$$

Степень готовности ремонтпригодной системы зависит от ее способности продолжать функционирование даже в случае отказа какого-либо волокна, узла или компонента в ее составе. Достигается это за счет реализации аппаратной избыточности (резервирования). Параллельное включение подсистем, узлов и компонентов оборудования значительно повышает общую готовность всей системы.

Результаты расчета коэффициента готовности системы от среднего времени простоя приведены в таблице 10.1. Как следует из таблицы, с увеличением числа цифр 9 значение времени простоя резко уменьшается, поэтому часто коэффициент готовности определяется таким словосочетанием, как ”девятки готовности”. Чтобы перевести коэффициент простоя в часы простоя, необходимо k_{Π} умножить на количество часов в году (8760 ч).

Таблица 10.1 – Время простоя системы в зависимости от коэффициента готовности

Коэффициент готовности	Коэффициент простоя	Время простоя, ч
0,999	0,001	$0,001 \cdot 8760 = 8,760$
0,9999	0,0001	$0,0001 \cdot 8760 = 0,8760$ (52,6 мин)
0,99999	0,00001	$0,00001 \cdot 8760 = 0,0876$ (5,3 мин)
0,999999	0,000001	$0,000001 \cdot 87600 = 0,00087$ (32 с)
0,9999999	0,0000001	$0,0000001 \cdot 8760 = 0,0008$ (3 с)

На данном этапе внедрения волоконно-оптических сетей связи допустимое время простоя ВОЛС принято $t_{\Pi} < 0,175$ ч/год, что соответствует коэффициенту простоя $k_{\Pi} < 0,00002$ или коэффициенту готовности $k_{\Gamma} > 0,99998$.

Приведенные параметры надежности установлены для начального этапа функционирования ВОЛП. Задача следующего этапа – добиться увеличения числа девяток в коэффициенте готовности и тем самым снизить время простоя ВОЛП в год, повысить безопасность движения поездов, а также увеличить прибыль железнодорожного транспорта.

Напомним также, что к основному мероприятию, повышающем надежность ВОЛП является резервирование сети (кольцевая конфигурация) и аппаратная резервирование (горячий резерв функциональных компонентов).

10.1 Надежность магистральной первичной сети

На действующих магистральных первичных сетях каналы ТЧ протяженностью 12500 км независимо от типов использованных систем передачи должны обеспечиваться следующие показатели надежности по сбоям:

- коэффициент готовности – не менее 0,92;
- среднее время между сбоями – не менее 5,0 ч;
- среднее время восстановления – не более 0,4 ч.

В каналах ТЧ и ОКЦ протяженностью 12500 км независимо от использованных систем передачи на магистральной первичной сети должны обеспечиваться следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,92;
- среднее время между отказами – не менее 12,5 ч;
- среднее время восстановления – не более 1,10 ч.

При длине канала, отличной от 12500 км, среднее время восстановления магистральной линии связи определяется по формуле

$$t_L = \frac{12500t_{12500}}{L}. \quad (10.8)$$

Время усреднения при определении показателей надежности каналов протяженностью 1000 км должно быть не менее трех месяцев.

При L , по протяженности отличающихся от 1000 км, время усреднения

$$t_{\text{уср}} = 3\sqrt{\frac{1000}{L}}. \quad (10.9)$$

Коэффициент готовности по отказам (сбоям) для всех типов сетевых трактов практически равен коэффициенту готовности канала ТЧ или ОКЦ.

На перспективной магистральной цифровой сети в каналах ТЧ первичной сети протяженностью 12500 км ожидаются следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,982;
- среднее время между отказами – не менее 230 ч;
- среднее время восстановления – не более 4,2 ч.

В каналах тональной частоты (ТЧ) всех типов систем передачи протяженностью 12500 км должны обеспечиваться следующие показатели аппаратной надежности (включая среду распространения):

- коэффициент готовности – не менее 0,92;
- среднее время между сбоями – не менее 40 ч;
- среднее время восстановления на одну неисправность, не более: обслуживаемых пунктов – 0,5 ч; необслуживаемых пунктов (с учетом времени доставки ремонтных бригад не более 2 ч) – 2,5 ч; кабеля – 10 ч.

Приведенные показатели надежности соответствуют каналам без резервирования.

10.2 Надежность дорожной первичной сети

На действующих дорожных первичных сетях должны обеспечиваться следующие показатели надежности по сбоям:

- коэффициент готовности – не менее 0,99;
- среднее время между отказами – не менее 40 ч;
- среднее время восстановления – не более 0,40 ч.

В каналах ТЧ и ОКЦ независимо от типов использованных систем передачи на действующей дорожной сети должны обеспечивать следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,99;
- среднее время между отказами – не менее 111 ч;
- среднее время восстановления – не более 1,10 ч.

При протяженности канала, отличной от 1400 км, среднее время восстановления дорожной линии связи

$$t_L = \frac{1400t_{1400}}{L}. \quad (10.10)$$

На перспективной цифровой дорожной сети в каналах ОКЦ ожидаются следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,998;
- среднее время между отказами – не менее 2050 ч;
- среднее время восстановления – не более 4,2 ч.

В каналах ТЧ всех типов систем передачи протяженностью 1400 км должны обеспечиваться следующие показатели аппаратурной надежности (включая среду распространения):

- коэффициент готовности – не менее 0,99;
- среднее время между сбоями – не менее 350 ч;
- среднее время восстановления на одну неисправность: обслуживаемых пунктов – не более 0,5 ч; необслуживаемых пунктов (с учетом времени доставки ремонтных бригад не более 2 ч) – не более 2,5 ч, кабеля – не более 10 ч.

Приведенные показатели надежности должны обеспечиваться в канале ТЧ без резервирования.

10.3 Надежность отделенческой первичной сети

На действующих отделенческих первичных сетях независимо от типов используемых систем передачи должны обеспечиваться следующие показатели надежности по сбоям:

- коэффициент готовности – не менее 0,997;
- среднее время между сбоями – не менее 150 ч;
- среднее время восстановления – не более 0,4 ч.

В каналах ТЧ и ОКЦ независимо от типов использованных систем передачи должны обеспечиваться следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,997;
- среднее время между отказами – не менее 400;
- среднее время восстановления – не более 1,1.

При протяженности канала, отличной от 500 км, требуемые показатели надежности определяются по формуле

$$t_L = \frac{500t_{500}}{L}. \quad (10.11)$$

На перспективной отделенческой сети связи при полном внедрении цифровых систем передачи в каналах ОКЦ ожидаются следующие показатели эксплуатационной надежности по отказам:

- коэффициент готовности – не менее 0,9994;
- среднее время между отказами – не менее 700 ч;
- среднее время восстановления – не более 4,2 ч.

В каналах ТЧ всех типов систем передачи протяженностью 500 км должны обеспечиваться следующие показатели аппаратурной надежности (включая среду распространения):

- коэффициент готовности по сбоям – не менее 0,9987;
- среднее время между сбоями – не менее 2500 ч;
- среднее время восстановления на одну неисправность: обслуживаемых пунктов – не более 0,5 ч; необслуживаемых пунктов (с учетом времени доставки ремонтных бригад не более 2 ч) – не более 2,5 ч, кабеля – не более 10 ч.

11 ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Волоконно-оптическая линия связи – сложный и многофункциональный комплекс ВОК, оборудования оконечных и промежуточных пунктов ВОЛП, опор, арматуры и монтажных устройств, домов связи, систем энергоснабжения и служебной связи, автоматики и телемеханики и др. Поэтому основной проблемой сегодняшнего дня становится эксплуатация и техническое обслуживание ВОЛП, обеспечение ее бесперебойного функционирования при заданных показателях качества передачи сообщений и надежности. Это связано с тем, что ВОЛП входит в систему управления перевозочным процессом (технологический сегмент), где полностью должны быть исключены случаи потери управления и, следовательно, потери прибыли. Это же относится и к коммерческому сегменту, где потерю связи следует расценивать как упущенную прибыль.

Главными документами, устанавливающими основные положения по технической эксплуатации средств связи на железных дорогах и порядок взаимодействия технического персонала по их содержанию в исправном состоянии устанавливают Правила технической эксплуатации железных дорог и другие нормативные документы. На основании нормативов затрат труда по эксплуатации технических средств ВОЛП разрабатываются технологические процессы проведения ре-

гламентных работ и другая нормативно-техническая и производственная документация. При этом стратегия технической эксплуатации должна обеспечить устойчивое и надежное содержание действующих средств связи на железнодорожном транспорте.

Основными документами, на которых базируется техническая эксплуатация ВОЛП, являются:

- Рекомендации МСЭ-Т М.10 – М.782, М. 3010;
- Правила технической эксплуатации железной дороги и первичных сетей связи.

В соответствии с этими документами основу технической эксплуатации ВОЛП составляют: техническое обслуживание устройств; ремонт; профилактика повреждений; ряд других мероприятий по обеспечению работоспособности сети.

Для осуществления общей стратегии технической эксплуатации ВОЛП целесообразно применять следующие виды технического обслуживания (ТО):

- *профилактическое*, выполняемое через определенные временные интервалы или в соответствии с заранее установленными критериями и направленное на уменьшение вероятности отказов;
- *корректирующее*, выполняемое после признания состояния неработоспособности объекта и направленное на его восстановление в состояние, в котором объект может выполнять требуемую функцию;
- *управляемое* – поддержание требуемого качества обслуживания путем систематического применения методов анализа с использованием централизованных средств наблюдения, пробных испытаний для сведения к минимуму профилактического обслуживания и уменьшения восстановительных работ.

По признаку установления форм кооперации и разделения труда применяются следующие методы технического обслуживания: бригадный; бригадно-участковый; участковый, цеховой.

По признаку централизации персонала методы технического обслуживания подразделяются на централизованный и децентрализованный.

Учитывая, что ни один из перечисленных методов ТО в чистом виде на практике не применяется, в зависимости от конкретной ситуации используется их сочетание.

Бесперебойная и высококачественная работа ВОЛП, нормальное сетевое взаимодействие первичной сети на базе ВОЛС с аналогичными сетями других операторов по вопросам технического обслужи-

вания, ремонта и выполнения аварийно-восстановительных работ обеспечиваются исполнением инструкции по технической эксплуатации волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта.

В инструкции рассматриваются методы технического обслуживания, производства различных видов ремонта и выполнения аварийных работ по восстановлению ВОЛП ЖТ с требуемыми качественными показателями, которые выполняются дистанциями сигнализации и связи, дистанциями электроснабжения и др. Техническое обслуживание ВОЛП включает: охранно-предупредительную работу; оперативный контроль технического состояния ВОЛП; текущее и планово-профилактическое обслуживание; технический надзор за строительством, реконструкцией и капитальным ремонтом.

Охранно-предупредительная работа проводится с целью недопущения повреждения кабеля и несущих конструкций при производстве работ в охранной зоне ВОК, а также недопущения повреждения оборудования СП СЦИ при производстве работ в служебно-технических зданиях.

Оперативный контроль технического состояния ВОЛП предусматривает: контрольные осмотры и проверку внешнего состояния ВОК, кабельных муфт, арматуры подвески, деталей узлов анкеровки ВОК; проверку состояния оптических волокон; проверку функционирования оборудования СП СЦИ, электропитающих устройств, системы тактовой сетевой синхронизации, систем охранно-пожарной сигнализации (ОПС), станционного оборудования, кондиционирования и т. п.

Текущее обслуживание ВОЛП включает следующие работы: расчистку подъездов к опорам с кабельными муфтами и технологическими запасами кабелей; устранение повреждений на кабельной линии; контроль состояния переходов ВОК через железнодорожные пути, автодороги, водные преграды и др.; содержание в исправном состоянии инвентаря, временных кабельных вставок, аварийного запаса кабеля, монтажных изделий, инструментов, приборов; внесение изменений в исполнительную документацию; контроль состояния станционного оборудования.

Планово-профилактическое обслуживание предусматривает: измерение параметров кабелей и станционного оборудования; выполнение работ по защите ВОК от механических повреждений (на спусках, вводах, мостах и др.); измерение стрел провеса и расстояний

между ВОК и проводами, подвешенными на опорах; установку предупредительных знаков; проверку работоспособности стационарного оборудования в соответствии с технологическими картами.

Технический надзор за строительством, реконструкцией, проведением среднего и капитальных ремонтов осуществляется работниками служб эксплуатации региональных компаний и дистанций сигнализации и связи (ШЧ) в течение всего периода производства работ с целью обеспечения соответствия выполнения строительно-монтажных работ проектным решениям, техническим требованиям, строительным нормам и правилам.

Основными задачами технической эксплуатации ВОЛП в пределах установленного участка являются:

- содержание линии передачи в соответствии с требованиями действующих технических норм;
- обеспечение требуемой надежности линии передачи;
- проведение аварийно-восстановительных работ;
- проведение работ по обеспечению сохранности линии передачи;
- сбор статистических данных о состоянии линии передачи, их анализ и разработка мероприятий по обеспечению требуемых показателей надежности и качественных показателей передачи сообщений;
- ведение производственной документации и статистической отчетности в соответствии с утвержденными нормами и инструкциями.

При технической эксплуатации ВОЛП выполняется обслуживание ЛКС, их ремонт и восстановление после аварии. Техническое обслуживание (ТО) ВОЛП также включает: охранно-предупредительную работу; оперативный контроль технического состояния линий передачи; текущее обслуживание; планово профилактическое обслуживание; технический надзор за строительством, реконструкцией и капитальным ремонтом линии передачи.

Охранно-предупредительные работы производятся с целью недопущения повреждения оптического кабеля и его несущих конструкций при производстве работ в пределах охранной зоны ВОК, а также недопущения повреждений оборудования систем передачи при производстве работ в служебно-технических зданиях.

Оперативный контроль предусматривает: контрольные осмотр и проверку внешнего состояния ВОК, кабельных муфт, арматуры подвески и деталей узлов анкеровки ВОК; проверку функционирования оборудования систем передачи, электропитающих устройств, такто-

вой сетевой синхронизации, охранно-пожарной сигнализации, кондиционирования и др.

Текущее обслуживание включает следующие работы: расчистку подъездов к опорам с кабельными муфтами и технологическими запасами кабелей; устранение повреждений на кабельных линиях; контроль состояния переходов ВОК через железнодорожные пути, автомобильные дороги, водные преграды и др.; содержание в исправном состоянии инвентаря, временных кабельных вставок, аварийного запаса кабеля, монтажных изделий, инструментов, приборов; внесение изменений в исполнительную документацию; контроль состояния стационарного кабеля.

Планово-профилактическое обслуживание состоит из следующих работ: измерение параметров кабелей и стационарного оборудования; выполнение работ по защите ВОК от механических повреждений (на спусках, вводах/выводах, при прокладке кабелей по мостам и др.); измерение стрел провеса и расстояний между ВОК и проводами, подвешенными на опорах; установка предупредительных знаков; проверка работоспособности стационарного оборудования в соответствии с технологическими картами.

Технический надзор за строительством, реконструкцией, проведением среднего и капитального ремонтов осуществляется работниками служб эксплуатации региональных операторов и дистанций сигнализации и связи в течение всего периода производства работ с целью обеспечения соответствия строительно-монтажных работ проектным решениям, техническим требованиям, строительным нормам и правилам (СНиП).

Техническое обслуживание ЛКС и стационарного оборудования, их ремонт и восстановление после аварий возложено на ЭТЦ, дистанции сигнализации и связи и энергоснабжения.

11.1 Ремонт оптических линий связи

Ремонт ВОЛП предусматривает выполнение комплекса операций по восстановлению, исправности и работоспособности линейно-кабельных сооружений и стационарного оборудования систем передачи.

В процессе технической эксплуатации ВОЛП в зависимости от ее технического состояния выполняются текущие и среднее ремонты

станционного оборудования, а также текущие и капитальные ремонты линейно-кабельных сооружений.

Текущий ремонт производится, как правило, подразделениями служб эксплуатации региональных операторов с участием работников дистанций сигнализации и связи и энергоснабжения. Он включает в себя: проверку узлов и элементов поддерживающих конструкций; регулировку стрелы провеса ВОК; проверку закрепления ВОК на опорах; регулировку расстояний между ВОК и проводами, подвешенными на опорах; ремонт ВОК; замену и восстановление отдельных изношенных, неисправных и поврежденных элементов поддерживающих конструкций; замену и восстановление отдельных частей станционного оборудования.

Объемы текущего ремонта и сроки его проведения обуславливаются техническим состоянием, объемами и характером неисправностей ВОЛП, выявленных в процессе технического обслуживания.

Средний ремонт станционного оборудования и капитальный ремонт ЛКС ВОЛП производится периодически по отдельным проектам на основании данных контрольно-технических осмотров, проверок и дефектных ведомостей эксплуатационного персонала региональных операторов или специализированными подрядными организациями.

Ремонт ВОЛП предусматривает выполнение комплекса операций по восстановлению исправности и работоспособности линейно-кабельных сооружений и станционного оборудования.

В процессе технической эксплуатации ВОЛП в зависимости от ее технического состояния выполняются текущие и средние ремонты станционного оборудования, а также текущие и капитальные ремонты линейно-кабельных сооружений.

Текущий ремонт производится, как правило, подразделениями служб эксплуатации региональных компаний с участием работников дистанций сигнализации и связи и электроснабжения за счет смет эксплуатационных расходов.

Средний ремонт станционного оборудования и капитальный ремонт ЛКС производятся периодически на основании данных контрольно-технических осмотров, проверок и дефектных ведомостей по отдельным проектам и сметам эксплуатационным персоналом региональных компаний или специализированными подрядными организациями, имеющими соответствующую лицензию.

Текущий ремонт ВОЛП включает в себя: проверку узлов и элементов поддерживающих конструкций; регулировку стрелы провеса ВОК; проверку надежности закрепления ВОК; регулировку расстояний между ВОК и проводами, подвешенными на опорах; замену и восстановление отдельных изношенных и неисправных элементов поддерживающих конструкций; ремонт ВОК (в случае повреждения, не вызвавшего перерыва связи); замену и (или) восстановление отдельных частей станционного оборудования.

Объемы текущего ремонта и сроки его проведения обуславливаются техническим состоянием, объемами и характером неисправностей ВОЛП, выявленных в процессе технического обслуживания.

11.2 Аварийно-восстановительные работы

К аварийно-восстановительным (АВР) относятся работы, проводимые с целью оперативного восстановления работоспособности линейных сооружений ВОЛС и станционного оборудования ВОЛП. Их следует проводить немедленно после получения соответствующей информации и выполнять непрерывно в объемах, обеспечивающих восстановление действия ВОЛП в кратчайшие сроки. При этом необходимо стремиться к исключению задержки поездов.

Кабели ВОЛС в соответствии с требованиями ПТЭ железных дорог подлежат первоочередному восстановлению как содержащие каналы оперативно-технологической связи.

Продолжительность АВР исчисляется с момента обнаружения полного или частичного прекращения действия связи до полного обеспечения пропускной способности восстановленной ВОЛП. Максимальная продолжительность восстановления ВОЛП независимо от погодных условий и времени суток должна составлять не более 6 часов без резерва и 1 часа – с резервированием по другим направлениям передачи.

АВР производится работниками дистанций сигнализации и связи (ШЧ) и ЭТЦ в соответствии с утвержденными инструкцией и технологическими картами, регламентирующими организацию и порядок выполнения восстановительных работ.

Длительностью устранения повреждений при проведении АВР следует считать время от момента появления аварийного сигнала о нарушении связей до их восстановления, в том числе за счет включе-

ния временных кабельных вставок, переключения на резервные тракты и т. п.

Все аварии на ВОЛП, особенно вызвавшие задержку поездов, подлежат расследованию с составлением акта соответствующей формы.

12 ПРОБЛЕМЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

На экономические показатели железных дорог существенное влияние оказывают множество факторов, среди которых важное значение имеют средства автоматизации, телемеханики и связи. Экономическая эффективность от внедрения на железной дороге ВОЛП достигается за счет улучшения показателей управляемости дороги, предприятий, организаций и др., увеличения безопасности перевозки грузов и пассажиров, предоставления клиентам дороги более качественных услуг связи и др.

Основной проблемой, решаемой в процессе создания и последующей эксплуатации систем передачи информации, является обеспечение заданных показателей надежности при минимизации годовых приведенных затрат. Условие минимизации приведенных годовых затрат:

$$C_{\text{гр}} = \min \{ C_i + \sum (C_m + C_l + \dots) d \}, \quad (12.1)$$

где C_i – размер капитальных вложений, отнесенный к нормативному сроку окупаемости сети связи и необходимый для достижения требуемого значения ее коэффициента готовности, которое в свою очередь непосредственно связано с достижением максимально возможного среднего времени t наработки на отказ;

C_m – ожидаемые годовые эксплуатационные затраты на обслуживание первичной сети связи, связанные с достижением минимально возможного среднего значения времени t_v восстановления отказа;

C_l – ожидаемая годовая стоимость нарушения трафика (упущенная выгода) в i -й год;

d – корректирующий коэффициент для расчета стоимости годовых затрат в i -й год с приведением их к текущему уровню цен.

Расчеты этих параметров сети производятся с учетом рекомендаций МЭС «Техническая эксплуатация: введение и общие принципы технической эксплуатации и организации технической эксплуатации».

В простейшем случае вопросы экономического характера можно свести к расчету необходимого оборудования и материалов, а также объема работ по установке и монтажу оборудования и создания волоконно-оптической сети железной дороги. Пример таких расчетов представлен в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Ведомости объема работ, необходимых материалов и оборудования для создания волоконно-оптической сети связи железной дороги

Наименование работ		Объем работ	
1 Монтаж оборудования			
1.1 Установка, монтаж, регулировка и настройка мультиплексоров, шт.			
Тип мультиплексора	Siemens SURPASS hit 7070	Siemens SMA 4/1	
ОУ1 (ДУ)	2	2	
ОУ2	2	2	
ОУ3	2	2	
Ст.1	–	1	
Ст.2	–	1	
Ст.3	–	1	
1.2 Установка усилительных, регенерационных пунктов, элементов компенсации дисперсии			
Участок	Усилительные пункты, шт.	Регенерационные пункты, шт.	Элементы компенсации дисперсии (количество участков, шт / длина компенсационного волокна, км)
ОУ1 (ДУ) – ОУ2	7	0	7/5,07
ОУ2 – ОУ3	4	0	6/3,95
ОУ3 – ОУ1 (ДУ)	7	1	–
ОУ3 – регенератор	4	0	3/7,73
Регенератор – ОУ1 (ДУ)	3	0	3/6,08
ОУ1 (ДУ) – Ст.1	3	0	3/6,08
Ст.1 – ОУ3	4	0	3/7,73
ОУ1 (ДУ) – Ст.2	0	0	0/0
Ст.2 – ОУ2	6	0	4/8,14
ОУ2 – Ст.3	2	0	0/0
Ст.3 – ОУ3	2	0	0/0
2 Строительно-монтажные работы			
2.1 Прокладка волоконно-оптического кабеля в грунт (подвеска), измерение параметров оптических волокон, км			
ОУ1 (ДУ) – ОУ2		360	
ОУ2 – ОУ3		240	
ОУ3 – ОУ1 (ДУ)		420	

13 ОХРАНА ТРУДА ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Во время технической эксплуатации ВОЛП на работников могут воздействовать следующие опасные и вредные производственные факторы:

- движущийся подвижной состав и транспортные средства;
- движущиеся строительно-монтажные машины, механизмы, оборудования и их элементы, разрушающиеся конструкции;
- перемещаемые строительные материалы, сборные конструкции и другие предметы;
- повышенная запыленность и загазованность воздуха в рабочей зоне;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- высокое напряжение электрических цепей;
- повышенный уровень электромагнитного излучения;
- повышенная напряженность электрического и магнитного поля;
- повышенная и пониженная температура поверхности оборудования, инвентаря, инструмента и воздуха рабочей зоны;
- повышенные уровни шума и вибраций на рабочем месте;
- расположение рабочего места на значительной высоте относительно поверхности земли;
- химически опасные и вредные факторы при работе с химикатами и пластмассами (растворителями, очистителями, эпоксидными, полиуретановыми композициями и др.);
- нервно-психические перегрузки при выполнении работ на значительной высоте, на железнодорожных путях, мостах и тоннелях во время движения поездов;
- лазерное и ультрафиолетовое излучение;
- осколки оптического волокна, попадающие на кожу, в глаза, дыхательные органы.

Работники, осуществляющие пуско-наладочные работы и техническую эксплуатацию станционного оборудования ВОЛП, должны:

- знать конструктивные особенности оборудования, чтобы исключить непреднамеренный доступ к зонам с опасным уровнем оптического излучения;
- соблюдать требования безопасности, исключая возможность воздействия опасного излучения, с учетом класса лазерного

изделия (лазера) по степени опасности генерируемого лазерного излучения и уровня опасности ВОЛП, указанном на предупреждающих надписях на оборудовании;

- знать величины мощности оптического излучения, передающегося по ОВ во всех местах возможного доступа к этому излучению и максимально возможную погрешность измерений, продолжительность срабатывания систем автоматического снижения мощности излучения;

- устанавливать в местах возможного доступа к оптическому излучению сигнальные знаки (таблички), предупреждающие об опасности;

- знать условия, при которых может произойти отключение системы автоматического снижения мощности, соблюдать требования безопасности при отключении этой системы;

- знать операции, которые необходимо выполнить для восстановления системы;

- обладать знаниями и умениями, необходимыми для предотвращения несанкционированного доступа к месту с опасным уровнем лазерного излучения;

- знать классификацию лазерных изделий (лазеров) по степени опасности генерируемого излучения по ГОСТ Р50723 и уровней опасности волоконно-оптической системы передачи по МЭК 825-2.

При строительстве и ремонте, техническом обслуживании ВОЛС работники монтажных и эксплуатационных организаций должны:

- выполнять требования запрещающих, предупреждающих, указательных и предписывающих знаков, надписей, звуковых и световых сигналов, подаваемых машинистами, составителями поездов, водителями транспортных средств;

- проходить по территории железнодорожных станций и перегонам в соответствии с установленными маршрутами передвижения, пользуясь пешеходными дорожками, проходами и переходами.

Работники дистанций сигнализации и связи, выполняющие монтаж и техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений и станционного оборудования ВОЛП, должны знать:

- действие на человека опасных и вредных производственных факторов, возникающих во время работы;

- требования электробезопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии;

– правила нахождения на железнодорожных путях; видимые и звуковые сигналы, обеспечивающие безопасность движения, знаки безопасности и порядок ограждения подвижного состава, безопасные приемы в выполнении работ и использования оборудования и приборов;

– места расположения аптечек первой помощи.

Кроме приведенных общих требований охраны труда при монтаже и технической эксплуатации ВОЛП на железных дорогах разработаны также отдельные инструкции, устанавливающие основные требования безопасности для электромехаников связи, электромонтеров контактной сети и других специалистов, выполняющих работы по монтажу ОВ, ВОК, ВОЛС, ВОЛП и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волоконно-оптическая линия связи – сложный и многофункциональный комплекс ВОК, оборудования оконечных и промежуточных пунктов ВОЛП, опор, арматуры и монтажных устройств, домов связи, систем энергоснабжения и служебной связи, автоматики и телемеханики и др. Сеть связи входит в систему управления перевозочным процессом), где полностью должны быть исключены случаи потери управления и, следовательно, потери прибыли. Поэтому основной проблемой является проектирование, эксплуатация и техническое обслуживание сети связи, обеспечение ее бесперебойного функционирования при заданных показателях качества передачи сообщений, надежности и устойчивости.

Перспективность ВОЛП обусловлена:

– большой пропускной способностью ОВ;
– большой непосредственной дальностью связи по сравнению с дальностью по электрическим кабелям;

– защищенностью от внешних электромагнитных полей, вследствие чего не требуется применять специальные меры по защите от мешающих и опасных влияний линий электропередачи и электрифицированных железных дорог;

– возможность прокладки кабеля между точками с большой разностью потенциалов;

– высокой помехозащищенностью линейных трактов магистрали;

– малой металлоемкостью и отсутствием цветных металлов (медь, свинец, алюминий) в кабеле;

– малым значением коэффициента затухания в широкой полосе частот, что обеспечивает большие длины регенерационных (усилительных) участков по сравнению с электрическими кабелями;

– небольшой массой и размерами кабеля.

Проблемой ближайшего будущего является увеличение пропускной способности ВОЛП на основе технологии спектрального уплотнения WDM/DWDM. В ближайшее время пропускная способность ВОЛП на основе технологии WD/DWDM возрастет на один-два порядка и достигнет 10 Тбит/с.

Перспективным направлением развития является также создание мультисервисной сети связи с использованием преимущественно пакетных методов передачи и широкополосных каналов. Теоретической предпосылкой этого служит концепция сетей нового поколения Next Generation Networks (NGN). Она позволяет сформировать общие системные решения, обеспечивающие совместимость и взаимодействие существующих и будущих сетей связи.

Отметим также, что важной задачей для железнодорожного транспорта является проблема волоконно-оптических линий на так называемой «последней миле» для обеспечения на участках железных дорог подключения к ВОЛП оконечных устройств связи и СЖАТ.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Шмыгинский, В. В. Многоканальная связь на железнодорожном транспорте / В. В. Шмыгинский, В. П. Глушко, Н. А. Казанский; под ред. В. В. Шмыгинского. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 704 с.

2 Кириллов, В. И. Многоканальные системы передачи : учеб. для вузов / В. И. Кириллов. – М. : Новое знание, 2002. – 751 с.

3 Семенюта, Н. Ф. Волоконно-оптические линии связи и телекоммуникационные системы передачи на железнодорожном транспорте : учеб.-метод. пособие / Н. Ф. Семенюта, П. М. Буй. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 205 с.

4 Виноградов В. В. Волоконно-оптические линии связи : учеб. пособие для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / В. В. Виноградов, В. К. Котов, В. Н. Нуприк. – М. : ИПК «Желдориздат», 2002. – 278 с.

5 Портнов, Э. Л. Оптические кабели связи: Конструкции и характеристики / Э. Л. Портнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 232 с.

6 Слепов, Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2000. – 488 с.

7 Убайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 267 с.

8 Шмалько, А. В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения / А. В. Шмалько. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 282 с.

9 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003. – 440 с.

10 Иоргачев, Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. – М. : Эко-Трендз, 2002. – 283 с.

11 Москвитин, В. Д. От взаимозависимой сети связи к Единой сети электросвязи / В. Д. Москвитин // Вестник связи. – 2003. – № 8. – С. 33–48.

12 Багуц, В. П. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. П. Багуц, Н. П. Ковалев, А. М. Костроминов. – М. : Транспорт, 1991. – 286 с.

13 Здоровцов, И. А. Магистральные цифровые сети связи на железных дорогах : учеб.-метод. пособие / И. А. Здоровцов, Н. Ф. Семенюта. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 64 с.

14 Здоровцов, И. А. Магистральная цифровая сеть связи российских железных дорог / И. А. Здоровцов, Н. Ф. Семенюта // Вестник связи. – 2003. – № 5. – С. 45–49.

15 Здоровцов, И. А. Основы теории надежности волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта / И. А. Здоровцов, В. Ю. Королев. – М. : МАКС Пресс, 2004. – 308 с.

16 Инфокоммуникации Российских железных дорог. Состояние и перспективы развития. – М. : МАС, 2006. – 192 с.

17 НТИ ЦТКС–ФЖД-2002 Нормы технологического проектирования телекоммуникационных сетей на федеральном железнодорожном транспорте. – М. : Трансиздат, 2002. – 236 с.

18 Семенюта, Н. Ф. Новый этап развития магистральных цифровых сетей связи / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов // Вестник связи. – 2004. – № 1. – С. 32–34.

19 Семенюта, Н. Ф. Проблемы надежности волоконно-оптических линий передачи / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов, Д. Н. Шевченко // Вестник связи. – 2009. – № 4. – С. 37–40.

20 Правила технической эксплуатации Белорусской железной дороги : приказ начальника Белорусской железной дороги от 04.12.2002 № 292Н.

21 СТП 09150.19.015-2005. Приемка в эксплуатацию законченных строительством волоконно-оптических линий связи. Порядок приемки : приказ начальника Белорусской железной дороги от 14.04.2004 № 224НЗ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

План пояснительной записки курсового проекта

ВВЕДЕНИЕ

1 АНАЛИЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

1.1 Описание железной дороги

1.2 Выбор топологии построения волоконно-оптической сети связи

1.3 Структура волоконно-оптической сети связи и расчет каналов на ее участках

1.4 Резервирование каналов на участках волоконно-оптической сети связи

1.5 Выбор технологии и оборудования передачи данных волоконно-оптической сети связи

1.6 Выбор типов кабеля волоконно-оптической сети связи

2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

2.1 Расчет длины усилительного участка волоконно-оптической сети связи

2.2 Расчет длины регенерационного участка волоконно-оптической сети связи

2.3 Расчет дисперсии оптического волокна на участках волоконно-оптической сети связи

2.4 Расстановка усилительных и регенерационных пунктов на участках волоконно-оптической сети связи

3 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

3.1 Ведомость объема работы по созданию волоконно-оптической сети связи

3.2 Ведомость материалов и оборудования для создания волоконно-оптической сети связи

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ

5 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

6 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

Исходные данные для выполнения курсового проекта

1 Название железной дороги выбирается в соответствии с шифром из таблицы Б.1.

Таблица Б.1

Последняя цифра шифра	Название железной дороги	Последняя цифра шифра	Название железной дороги
0	Октябрьская	5	Куйбышевская
1	Горьковская	6	Красноярская
2	Юго-Восточная	7	Белорусская
3	Северная	8	Юго-Западная
4	Одесская	9	Московская

2 Требуемое число каналов для различных видов связи на направлениях: K_1 (отделенческая сеть, между станциями и отделением дороги); K_2 (дорожная сеть, между соседними отделениями дороги); K_3 (дорожная сеть, между дорожным узлом и отделениями дороги) выбирается в соответствии с шифром из таблицы Б.2.

3 Количество потоков $E1$ и $E0$ для вторичных сетей (ОТС, ОБТС, СПД) выбирается в соответствии с шифром из таблицы Б.2. K_i количество каналов, равное K_1 , K_2 , или K_3 в зависимости от вида связи.

Таблица Б.2

Предпоследняя цифра шифра	Требуемое число каналов			Количество потоков $E1$ и $E0$ во вторичных сетях связи		
	K_1	K_2	K_3	ОТС	ОБТС	СПД
0	50	530	1000	$2K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E0$	$0,5K_i \cdot E1$
1	55	470	970	$0,5K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E1$
2	60	410	940	$2K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E0$	$0,5K_i \cdot E1$
3	65	350	910	$0,5K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E1$
4	70	290	880	$1,5K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E0$	$K_i \cdot E1$
5	75	260	850	$0,5K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E1$
6	80	320	820	$K_i \cdot E0$	$K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E1$
7	85	380	790	$1,5K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E0$	$0,5K_i \cdot E1$
8	90	440	760	$K_i \cdot E0$	$2K_i \cdot E0$	$K_i \cdot E1$
9	95	500	730	$1,5K_i \cdot E0$	$K_i \cdot E0$	$1,5K_i \cdot E1$

4 Тип уплотнения (пространственное или спектральное) оптических потоков в одном волоконно-оптическом кабеле выбирается в соответствии с шифром из таблицы Б.3.

5 Вид прокладки волоконно-оптического кабеля (подвеска на опорах электротяги или СЦБ, прокладка в грунт) выбирается в соответствии с шифром из таблицы Б.3.

6 Задание для исследовательской работы выдается преподавателем отдельно.

Таблица Б.3

Первая цифра шифра	Тип уплотнения оптических потоков	Вид прокладки ВОК	Первая цифра шифра	Тип уплотнения оптических потоков	Вид прокладки ВОК
0	Пространственное	Подвеска	5	Спектральное	В грунт
1		В грунт	6		Подвеска
2		Подвеска	7		В грунт
3		В грунт	8		Подвеска
4		Подвеска	9		В грунт

Учебное издание

Буй Павел Михайлович
Семенюта Николай Филиппович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *И. И. Эвентов*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 30.10.2014 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,42. Тираж 200 экз.
Зак № . Изд. № 140

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель.