

Н. Ф. СЕМЕНЮТА, П. М. БУЙ

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ



Гомель 2012

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

Кафедра «Системы передачи информации»

Н. Ф. СЕМЕНЮТА, П. М. БУЙ

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ
ЛИНИИ СВЯЗИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ
ТРАНСПОРТЕ

*Под редакцией профессора, академика Международной Академии Связи
Н. Ф. СЕМЕНЮТЫ*

*Одобрено методической комиссией электротехнического факультета
в качестве учебно-методического пособия по дисциплине
«Многоканальные системы передачи информации»*

Гомель 2012

УДК 656.254.5
ББК 39.17
С30

Рецензенты: зав. кафедрой «Системы передачи информации» доцент
В. Г. Шевчук (УО «БелГУТ»); профессор кафедры
«Электрическая связь» *В. А. Кудряшов* (ПГУПС)

Семенюта, Н. Ф.

С30 Волоконно-оптические линии связи и телекоммуникационные системы передачи на железнодорожном транспорте : учеб.-метод. пособие по дисциплине «Многоканальные системы передачи информации» / Н. Ф. Семенюта, П. М. Буй ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 205 с.

ISBN 978-985-468-910-4

Изложены теория передачи оптических сигналов по оптическим волокнам и волоконно-оптическим кабелям, основы технологии временного и волнового мультиплексирования, принципы построения многоканальных систем передачи и сетей телекоммуникаций железнодорожного транспорта, элементы систем и аппаратуры.

Рассмотрены вопросы технического обслуживания и эксплуатации, контроля и измерения параметров оптических кабелей, каналов и трактов передачи, надежности.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; может быть использовано инженерно-техническими работниками дистанций сигнализации и связи, предприятий связи, энергоснабжения.

УДК 656.254.5
ББК 39.17

ISBN 978-985-468-910-4

© Семенюта Н. Ф., Буй П. М., 2012
© Оформление. УО «БелГУТ», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Внедрение современных информационных технологий во все сферы производственно-хозяйственной деятельности железнодорожного транспорта потребовало коренного переустройства существующей аналоговой сети связи на основе применения волоконно-оптических кабелей (ВОК) и цифровых систем передачи.

Начало переустройств аналоговых сетей связи на большинстве железных дорог началось с введения в эксплуатацию цифровых систем передачи с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), а в последующем внедрением волоконно-оптических линий передач (ВОЛП), территориально объединяющих управление железной дороги с отделениями дорог и последних – между собой. ВОЛП, составляющие основу первичной сети дорожной цифровой сети связи (ДЦСС) железной дороги, предназначены для организации вторичных сетей связи и удовлетворения потребностей в каналах и трактах передачи как самой железной дороги (технологический сегмент), так и предоставления на коммерческой основе услуг связи юридическим лицам с разными формами собственности (коммерческий сегмент).

Первая в СССР и на железнодорожном транспорте экспериментальная ВОЛП на длине волны 0,85 мкм для организации технологической связи была введена в эксплуатацию в 1966 году на участке Ленинград – Волховстрой Октябрьской железной дороги. Ее протяженность составила 112 км и емкость 240 каналов тональной частоты, полученные с помощью двух многоканальных цифровых систем передачи ИКМ-120.

В настоящее время самой совершенной волоконно-оптической сетью связи является магистральная цифровая сеть связи (МЦСС) Российских железных дорог (РЖД), созданная на базе ВОК отечественного производства и аппаратуры синхронной цифровой иерархии. МЦСС протянулась с запада на восток и с севера на юг России более чем на 55 тыс. км и обеспечивает связь со всеми железными дорога-

ми России и ее подразделениями, а также выход на сети связи стран СНГ, зарубежных железных дорог и сетей связи общего пользования.

Строительство МЦСС выполнило ЗАО «Компания ТрансТелеКом» (ТТК) вдоль трассы РЖД и по своим технико-экономическим показателям она уникальна и создана с использованием новейших телекоммуникационных технологий. Пропускная способность ее такова, что позволяет полностью решить проблемы по услугам связи не только железным дорогам России, но и всем, кто связан с транспортной системой России: морскому, речному, автомобильному, авиационному и другим видам транспорта, а также таможенникам, пограничникам, медикам и др. – всем, кто составляет основу экономики России.

Основное назначение МЦСС – это повышение качественных показателей железнодорожных перевозок и значительное сокращение эксплуатационных затрат за счет внедрения оптимальных информационных технологий управления перевозочным процессом. В первую очередь здесь следует отметить создание на базе МЦСС региональных центров диспетчерского управления движением поездов, которые позволяют диспетчеру контролировать выполнение графика движения поездов, находящихся на расстояниях нескольких тысяч километров от центра. МЦСС открывает новые возможности при использовании автоматизированной системы по продаже билетов на пассажирские поезда «Экспресс-3», разработанной сетевой интегрированной системы СИРИУС, средств идентификации подвижного состава и др.

МЦСС позволяет значительно повысить эффективность работы всех транспортных компаний России, внедрить новые прогрессивные информационные технологии. Сеть непосредственно соединяет между собой все города вдоль железных дорог, поэтому новой сетью могут пользоваться не только транспортные организации и предприятия, но и население крупных и средних городов, прилегающих к железной дороге. МЦСС позволяет организовать связь с населенными пунктами, особенно в отдаленных районах России. В этом большое социальное значение МЦСС.

Следует отметить, что применение ВОЛП на железнодорожном транспорте позволяет решить многие проблемы железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Поскольку оптические волокна (ОВ) не подвержены электромагнитному влиянию, то отпадает необходимость в электромагнитном экранировании ОВ и всего кабеля, и,

следовательно, кабель можно прокладывать в непосредственной близости от электрифицированной железнодорожной линии или даже в полотне железной дороги. Отсутствие в большинстве оптических кабелей электропроводных элементов снимает такие сложные проблемы, как защита от опасных и мешающих влияний контактной сети электрифицированных железных дорог, высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), грозовых разрядов, защита от блуждающих токов.

Многоканальные аналоговые системы передачи (АСП) достаточно подробно изложены в учебнике «Многоканальные системы передачи на железнодорожном транспорте».

В настоящем пособии рассмотрены основы теории распространения сигналов по оптическому волокну, изложены принципы построения цифровых систем передачи (ЦСП) и линейного тракта передачи по ВОК, а также технического обслуживания и др. Пособие написано академиком Международной академии связи (МАС), профессором Белорусского государственного университета транспорта Н. Ф. Семенютой, который стоял у истоков создания ВОЛП на железных дорогах, и доцентом П. М. Бум. В основу пособия положены лекции авторов для студентов электротехнического факультета и инженерно-технических работников дистанций сигнализации и связи института повышения квалификации, а также рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) и руководящие указания Белорусской железной дороги.

Пособие будет полезно студентам высших учебных заведений железнодорожного и других видов транспорта, изучающих дисциплины “Многоканальная связь”, “Специальные измерения и техническая диагностика устройств связи”, “Линии автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте” и пр., а также широкому кругу специалистов, разработчиков, проектировщиков волоконно-оптических линий связи и систем передачи информации.

Авторы с благодарностью примут любые замечания и предложения по изложенному материалу и улучшению содержания пособия, а также выражают благодарность коллегам кафедры «Системы передачи информации», рецензентам профессору кафедры «Электрическая связь» ПГУПС В. А. Кудряшову, доценту В. Г. Шевчуку за полезные предложения и замечания.

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX века оптическая связь прошла путь от теоретических исследований и опытных разработок до этапа, на котором создание работоспособных и надежных ВОЛП для народного хозяйства и железнодорожного транспорта стало реальностью. Причем наиболее перспективными стали кабельные оптоэлектронные системы передачи информации, работающие по ВОК.

Электрическая связь железнодорожного транспорта является ведомственной (корпоративной) сетью связи и представляет собой совокупность первичных и вторичных сетей связи, систем передачи и коммутации, расположенных и функционирующих на железных дорогах. Кроме того, для обеспечения заданного уровня показателей качественного и устойчивого функционирования телекоммуникационной сети связи железнодорожного транспорта при условии минимизации эксплуатационных затрат ее дополняют рядом других технологических систем, к которым относятся системы управления сетью, технической эксплуатации и метрологического обеспечения, тактовой сетевой синхронизации, служебной связи и т.п.

Оптические кабельные линии связи, по сравнению с лазерными, радиорелейными и радиoliniями связи, работающие в открытом пространстве, а также воздушными (ВЛС) и кабельными (КЛС) электрическими линиями связи, имеют существенные преимущества. Так, они позволяют значительно уменьшить расход дефицитных металлов (меди, свинца), уменьшить габариты и массу станционной аппаратуры и оборудования линейного тракта. По таким параметрам, как скрытность и помехозащищенность, ВОЛП не имеют себе равных. Они превосходят все существующие на сегодняшний день линии связи по ширине полосы пропускаемых частот, скорости передачи информации и многим другим параметрам.

Впервые возможность практического использования оптической связи открылась в 60-е годы прошлого века после изобретения академиками А. И. Прохоровым и Н. Г. Басовым оптического квантового генератора – лазера. В 1970 г. под руководством академика, лауреата Нобелевской премии 2000 г. по физике Ж. И. Алферова впервые был реализован полупроводниковый лазер на основе двойной гетероструктуры арсенида галлия *AlAs–GaAs* с непрерывной генерацией, а затем и быстродействующие, малощумящие фотоприемники. В

последующие годы большие успехи были достигнуты в разработке и изготовлении оптоэлектронных источников излучения, фотоприемников, фильтров, оптических разъемов и других элементов ВОЛП.

Луч лазера представляет собой когерентный, т. е. согласованный по направлению и фазе поток световых частиц – фотонов, которые могут распространяться на большие расстояния в виде узкого пучка света практически прямолинейно. Единственной преградой к практической реализации оптической связи была среда с высокими потерями световой энергии. Использование атмосферы Земли в «открытых» системах наземной и космической связи показало, что качественные показатели передачи и надежность связи по таким «открытым» оптическим линиям связи в сильной степени зависят от атмосферных и климатических условий, а также промышленных помех. Поэтому на начальном этапе создания ВОЛП для защиты лазерного луча от атмосферных помех и его концентрации в узкий пучок света были предложены «закрытые» оптические линии связи – линзовый волновод, представляющий собой заполненную газом трубу, в которой через 50–200 м размещались стеклянные линзы. Были разработаны также и другие волноводы, но все они оказались малопригодными для практической реализации в оптических системах передачи сообщений. Только с разработкой волоконного световода – ОВ на основе стекла (кварца) – и ВОК проблема среды для ВОЛП была решена. С этого времени начался новый этап в развитии ВОЛП, не менее бурный, чем после изобретения в 1946 г. полупроводникового триода – транзистора.

Достоинством ВОК по сравнению с электрическими кабелями связи являются:

- отсутствие в конструкции ОВ и созданных на их основе оптических кабелей дефицитных материалов (меди, алюминия, свинца);
- широкая полоса пропускания ОВ и как следствие этого большая пропускная способность ВОЛС;
- малая зависимость потерь световой энергии в ОВ от частоты в широкой полосе частот;
- возможность работы в широком диапазоне температур, в связи с незначительным ее влиянием на потери энергии в ОВ;
- полная защищенность ОВ от внешних электромагнитных полей;
- отсутствие взаимных влияний между отдельными ОВ;

- малые габариты и масса оптических кабелей (в 10–15 раз меньше, чем электрических кабелей);
- пригодность для прокладки оптических кабелей в существующих линейно-кабельных сооружениях, в грунте и на опорах воздушных линий связи и др.

Значительный технический эффект ВОК явился окончательным решением проблемы создания ВОЛП, которые стали повсеместно внедряться на магистральных, дорожных и отделенческих телекоммуникационных сетях связи на железнодорожном транспорте.

1 ЛИНИИ СВЯЗИ И СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

1.1 Общие сведения

Структурная схема системы передачи сообщений с использованием каналов первичной сети представлена на рисунке 1.1.

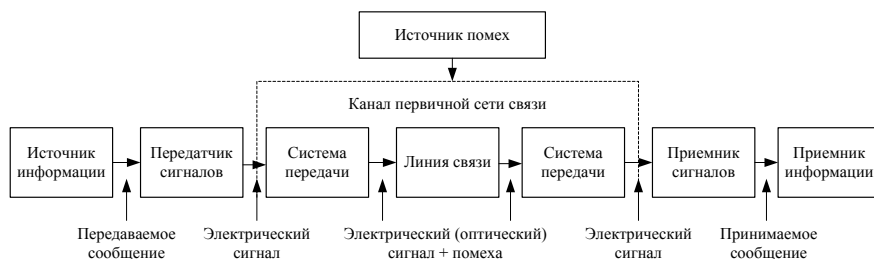


Рисунок 1.1 – Структурная схема системы передачи сообщений

Здесь под источником и приемником информации (сообщения) подразумевается человек или какое-либо техническое устройство. Передатчик (микрофон, телеграфный или факсимильный аппарат, ЭВМ и др.) преобразует сообщение в электрический сигнал, который поступает в канал связи. Канал связи образуют приемо-передающая аппаратура системы передачи и собственно линия связи (воздушная, кабельная с медными жилами или оптическими волокнами, радиолиния и др.), вместе составляющие каналы первичной сети связи. Приемник сигналов (телефон, телеграфный аппарат, ЭВМ и т. п.) преобразует электрический сигнал, поступивший с выхода канала связи, в сообщение.

На канал связи воздействуют помехи, которые искажают передаваемые сигналы и вносят ошибки в передаваемые сообщения, поэтому для ослабления действия помех принимают специальные меры защиты.

Таким образом, любую схему связи можно представить в виде трех ее основных элементов: передатчика и приемника сообщений (сигналов) и линии связи, состоящей из аппаратуры системы передачи и собственно линии связи.

Первичная сеть является основой для создания вторичных сетей связи, которые представляют совокупность каналов первичной сети, систем коммутации каналов или пакетов сообщений и их устройств, размещаемых в узлах связи, а также оконечного (терминального) оборудования, устанавливаемого, как правило, в местах пользования услугами связи, т. е. у пользователей сети. По такому принципу проектируются и строятся вторичные сети телефонной и телеграфной связи, передачи данных, телемеханики и других видов связи.

1.2 Линии связи

Линии связи (передачи информации) предназначены для передачи различных сообщений (телефонных, телеграфных, данных, телеуправления, телесигнализации и др.) от передатчика к приемнику. С первых лет возникновения электрической связи и до конца 50-х годов прошлого столетия в стране и на железных дорогах преобладали воздушные линии связи (ВЛС). С конца 50-х годов прошлого столетия на железных дорогах начали внедрять КЛС.

Необходимость в КЛС была вызвана следующими причинами.

Во-первых, это постоянный рост в потребностях в числе каналов и их пропускной способности ВЛС. В качестве систем уплотнения цветных цепей ВЛС использовались системы передачи для В-3-3 и В-12-3, которые обеспечивали соответственно 3 и 12 телефонных каналов (тональной частоты). При этом максимальное количество телефонных каналов (каналоемкость) по одной цветной цепи ВЛС составляло 3+12 и один канал низкой частоты по физической цепи.

Во-вторых, связь по ВЛС сильно зависела от природных условий (гололеда, изморози, песчаных бурь, сильного ветра и т. п.; ВЛС обладала недостаточной механической прочностью, а их трассы были легко обнаруживаемые как с земли, так и с воздуха, что демаскировало и промежуточные и оконечные объекты связи.

В третьих, ВЛС подвержены внешним опасным и мешающим влияниям высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) электрифицированных железных дорог, длинноволновых радиостанций, промышленных высокочастотных установок и др. Для ВЛС характерными являются также взаимные влияния между параллельными цепями.

Увеличение пропускной и провозной способности железных дорог, связанной с интенсификацией развития промышленного производства и сельского хозяйства страны, потребовала в конце 50-х годов прошлого столетия перехода (особенно на грузонапряженных направлениях) с паровозной на тепловозную и электровозную тяги, совершенствования методов оперативного управления подразделениями транспорта и внедрения для этих целей принципиально новых технических средств электрической связи железнодорожного транспорта. Кроме того, электрификация железных дорог на переменном токе, возросшая в этот же период тенденция автоматизации телефонных и телеграфных сетей связи, внедрение диспетчерской централизации для управления стрелками и сигналами на станциях и автоблокировки на перегонах для интервального регулирования движением поездов, телеуправление подстанциями электрифицированных железных дорог, создание сетей передачи данных также потребовало значительного увеличения каналов ТЧ.

Поэтому МПС СССР было принято решение (1959 г.) на железных дорогах с интенсивным движением поездов и электрифицируемых по системе переменного тока вместо ВЛС строить КЛС на основе симметричных электрических кабелей и использования систем передачи КВ-12, К-24, К-60 и др. Переход на КЛС неизбежно было связан с необходимостью увеличения капитальных затрат на реконструкцию технических средств аналоговой сети связи. Однако это же и позволяло значительно увеличить каналоемкость первичных сетей, повысить помехозащищенность каналов ТЧ от внешних электромагнитных воздействий и снизить эксплуатационные расходы, особенно по техническому содержанию линейных сооружений связи. Обеспечить возросшую потребность информационного обеспечения перевозочного процесса.

Потребность в каналах ТЧ, широкополосных каналах телевидения и передачи данных неуклонно возрастала, и следующим этапом (1992 г.) стал переход от электрических симметричных кабелей к во-

локонно-оптическим кабелям. Пропускная способность волоконно-оптических кабелей практически неограниченна, что позволяет организовать до десяти тысяч каналов ТЧ, широкополосных каналов и др.

Сегодня на земном шаре действует разветвленная сеть ВОЛС, эффективно работающих во всех природных средах – на суше, в воде, в воздухе. В XXI веке интенсивность развития оптических технологий стала общемировой, они уже занимают лидирующие позиции в создании современных высокоскоростных и широкополосных телекоммуникационных цифровых сетей связи и доступа к ним.

1.3 Аналоговые системы передачи

Переход от ВЛС на КЛС начался с внедрения симметричных кабелей и кабельных АСП отечественного производства. Началом можно считать 1959 г., когда была построена и введена в эксплуатацию первая КЛС на участке Чернореченск – Красноярск – Клюквенная (Уяр) Красноярской железной дороги. На этой КЛС (протяженностью почти 300 км) были применены магистральный кабель типа МКБ $14 \times 4 \times 1,2 + 5 \times 0,9 + 1 \times 0,7$ со свинцовой оболочкой, стальными защитными лентами брони и кордельно-бумажной изоляцией медных жил с диаметром 1,2 мм, а также двухполосная (36–84, 92–143 кГц) 12-канальная АСП с частотным разделением каналов типа КВ-12. В такой однокабельной линии связи для организации каналов ТЧ первичной сети связи магистрального, дорожного и частично отделенческого уровней предусматривалось шесть (из четырнадцати) высокочастотных четверок кабеля, которые симметрировались в спектре частот до 150 кГц и потенциально могли уплотняться 12 многоканальными системами передачи КВ-12.

Остальные восемь низкочастотных четверок симметрировались на частоте 800 Гц и использовались в тональном спектре частот 300–3400 Гц для организации каналов отделенческой сети связи. При этом необходимая дальность связи (до 150 км) достигалась за счет пупинизации, т.е. последовательного включения в цепи кабеля катушек индуктивности, с помощью которых компенсировалась емкостная составляющая цепи и уменьшались потери мощности передаваемых сигналов, что и обеспечивало увеличение дальности связи. Этот метод известен в теории связи как «пупинизация» кабельных цепей и связан с именем его изобретателя М. Пупина (1858–1935).

Сигнальные цепи КЛС предусматривались для организации связи систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

При таком распределении цепей максимальная каналоёмкость однокабельной КЛС составляла около 160 каналов ТЧ и НЧ, что более чем в два раза превышало максимальную каналоёмкость ВЛС.

Принятие технического решения объединить в одной КЛС цепи связи с сигнальными цепями СЖАТ, осуществить от магистрального кабеля через каждые 1–1,5 км ответвления к аппаратуре СЖАТ, расположенной на перегонах, использовать для компенсации емкостной составляющей НЧ цепей катушек индуктивности, конструктивно расположенных в громоздких чугунных ящиках массой до 100 кг, по тем временам имело положительное технико-экономическое обоснование. В то же время это решение являлось одной из основных особенностей построения первичной сети связи МПС, когда по одной и той же КЛС, проложенной вдоль полотна железной дороги, одновременно организуются все виды магистральных, дорожных и отделенческих связей, а также некоторые виды связей СЖАТ. Это обстоятельство непосредственно влияло на структуру построения первичной сети, предъявляло особые требования к выбору технических средств на ее реализацию и оказалось одной из технически сложных проблем, нерешенной до настоящего времени по качеству и надежности связи, оно же явилось препятствием к применению на симметричных КЛС появившихся многоканальных ЦСП из-за электромагнитной несовместимости ЦСП с системами СЖАТ при работе в одном кабеле на параллельных цепях.

Применение ящиков индуктивности, устанавливаемых через каждые 1700 м (шаг пупинизации), из-за нарушения герметичности кабеля, снижало надежность КЛС, что существенно удорожало стоимость строительства КЛС и не позволяло использовать пупинизированные цепи НЧ для уплотнения аналоговых систем передачи (АСП). По этим причинам в конце 60-х годов прошлого столетия пупинизация была исключена из практики строительства и эксплуатации КЛС. Вместо них для обеспечения требуемой дальности связи по НЧ цепям стали применять разработанные Конструкторским бюро Главного управления сигнализации и связи МПС СССР (КБ ЦШ) промежуточные дуплексные телефонные усилители (ПДТУ-67), работающие в тональной полосе частот 300–3400 Гц.

Неоспоримые технико-экономические преимущества однокабельных пупинизированных линий связи относительно ВЛС и создание материально-технической и производственной базы для строительства КЛС способствовали их быстрому распространению на сети железных дорог СССР. Поэтому уже к середине 60-х годов было построено несколько однокабельных КЛС, в том числе и на Белорусской железной дороге с использованием различных марок кабелей связи (МКБАБ $14 \times 4 \times 1,2$; МКПАБ $7 \times 4 \times 1,05$; МКСБ $7 \times 4 \times 1,2$) АСП с ЧРК отечественного (КВ-12) и зарубежного производства (ТН-12ТКЕ; ВО-12).

Во второй половине 60-х годов отечественной промышленностью были разработаны однополосные АСП емкостью на 24 (К-24) и 60 (К-60) каналов ТЧ, предназначенные для работы по двум отдельным симметричным кабелям связи в линейной полосе частот соответственно 12–108 и 12–252 кГц. Это создало все необходимые предпосылки для строительства двухкабельных линий связи с применением однополосных систем передачи типа К-24, К-60, а несколько позже – К-60П. В сравнении с однокабельными, двухкабельные КЛС позволяли существенно увеличить количество каналов ТЧ, улучшить их качество и обеспечить дальность передачи информации до 12,5 тыс. км с выполнением международных норм по мощности шума в каналах ТЧ.

Первая двухкабельная КЛС с многоканальной АСП типа К-24 была построена и введена в эксплуатацию в 1965 году на участке Абакан – Тайшет Красноярской железной дороги. В дальнейшем двухкабельные КЛС были построены и на других железных дорогах. Однако двухкабельные линии с АСП типа К-24 не получили широкого распространения, так как к этому времени уже была освоена в производстве новая АСП типа сначала на электронных лампах (К-60), а затем с применением полупроводниковых приборов (К-60П), которая стала основной системой передачи для организации первичных аналоговых сетей связи железнодорожного транспорта.

В соответствии с техническими указаниями по проектированию связи на железнодорожном транспорте базовой системой связи была определена двухкабельная линия передачи с применением кабеля марки МКПАБ $7 \times 4 \times 1,05$, интенсивное строительство которых началось с 1967 года практически на всех железных дорогах.

Для организации каналов ТЧ первичной сети связи магистрального и дорожного уровней в каждом кабеле двухкабельной КЛС выделялись три четверки (2, 4, 6), которые симметрировались в спектре частот до 252 кГц и уплотнялись системой передачи К-60П. Каналы ТЧ системы К-60П предназначались для создания магистральной и дорожной телефонной и телеграфной связи, а также среднескоростной передачи данных.

Каналы отделенческих связей (телефонные, телеграфные, передачи данных, телеуправления и телесигнализации и др.) организовывались, как правило, по двухпроводным физическим цепям в тональной полосе частот 300–3400 Гц. Для этих цепей в каждом кабеле было предусмотрено четыре четверки (1, 3, 5, 7), которые симметрировались на частоте 800 Гц и не пупинизировались. Для увеличения дальности телефонной связи использовались промежуточные телефонные дуплексные усилители (ПТДУ-67 и ПТДУ-М), обеспечивающие дальность телефонной связи до 100–120 км.

В первой половине 60-х годов отечественной промышленностью был разработан и освоен в серийном производстве специально для железных дорог симметричный кабель марки МКПАБ $7 \times 4 \times 1,05 + 5 \times 2 \times 0,7 + 1 \times 0,7$ с улучшенными технико-экономическими показателями. В кабеле МКПАБ применялись полиэтиленовая изоляция медных жил диаметром 1,05 (вместо 1,2 мм), алюминиевая оболочка и несколько слоев стальных лент в качестве брони, покрытых снаружи полиэтиленовым шлангом.

Из семи четверок жил кабеля три симметрировались в спектре частот до частоты 252 кГц (вместо 150 кГц) и предназначались для уплотнения АСП типа К-60. Остальные четыре четверки предусматривались для организации НЧ каналов в тональном спектре частот 300–3400 Гц. Пять сигнальных пар ($5 \times 2 \times 0,7$) предназначались для работы СЖАТ (автоблокировки, частотного диспетчерского контроля, переездной сигнализации и др.).

Алюминиевая оболочка и стальная броня обеспечивали высокую механическую прочность кабеля и требуемый коэффициент защитного действия от электромагнитных влияний (не более 0,1 на частоте 50 Гц и 0,02 на частоте 800 Гц). Это позволило осуществлять механизированную прокладку кабеля вдоль электрифицированных железных дорог (в том числе непосредственно в тело земляного полот-

на) и обеспечить защиту рабочих цепей кабеля от опасных и мешающих электромагнитных влияний электрифицированных железных дорог.

В целом же двухкабельные линии передачи, несмотря на ряд технических усовершенствований, выполненных в 1965–1970 гг., имеют существенные недостатки. Цепи двухкабельных КЛС используются неэффективно, так как до 60 % цепей не уплотняется. На каждой из цепей (как уже отмечалось) образуется лишь один канал связи в тональной полосе частот. Параметры телефонных каналов избирательных связей не удовлетворяют, как правило, требуемым нормам по уровню шумов и амплитудно-частотным характеристикам. На один каналоклометр связи расходуется значительное количество цветных металлов, особенно меди (около 15,5 кг).

При организации обходных каналов отделенческих связей неэффективно использовались каналы ТЧ. Кроме того, для связи с промежуточными пунктами необходимо часто устанавливать аппаратуру выделения каналов из АСП типа К-60П или делать переприемы по ТЧ, а это существенно снижает качественные показатели каналов магистральной и дорожной связи и значительно увеличивает капитальные затраты на сооружение первичной сети в целом.

Отмеченные недостатки организации на двухкабельных линиях передачи ОТС отделения железной дороги снижали эффективность использования КЛС, не позволяли иметь резерв каналов на перспективное развитие сети связи и поэтому фактически стали тормозом для внедрения современных информационных технологий.

С целью решения указанной проблемы в 1976–1980 гг. КБ ЦШ совместно с учеными и специалистами кафедры «Электрическая связь» ЛИИЖТа и ЦНИИ МПС была успешно выполнена научно-исследовательская работа по определению наиболее рациональной структуры ОСС и технических средств для ее реализации. В результате выполненных исследований была разработана специализированная двухкабельная АСП типа К-24Т (кабельная 24-канальная распределительная транспортная система передачи), обеспечивающая реализацию прямых, групповых и многоточечных каналов для построения вторичных сетей ОТС, ПДИ и СОП отделенческой сети связи.

На основании выполненных исследований и наметившейся тенденции перехода от автоматизации отдельных технологических процессов

к автоматизации управления всей отраслью железнодорожного транспорта на основе применения совершенных технических средств автоматики и вычислительной техники МПС СССР в 1987 году приняло решение о строительстве на железных дорогах одно-, двух- и трехкабельных линий связи. Причем, однокабельные линии связи строить в ограниченных количествах, в основном на рокадных и тупиковых участках железных дорог, где потребность в каналах магистральной и дорожной связи невелика, а трехкабельные линии – только на особо грузонапряженных участках железных дорог. Основной же была определена двухкабельная линия с применением кабеля типа МКПАБ $7 \times 4 \times 1,05$ аппаратуры уплотнения К-60П для магистральной и дорожной сетей связи и К-24Т – для первичной ОСС.

Дальнейшим направлением развития первичной сети связи железных дорог явилась разработка и производство АСП типа К-60Т. По сравнению с системой К-60П система передачи К-60Т обладала более широкими функциональными возможностями, обеспечивала многократное выделение до 12 каналов ТЧ в любом пункте железнодорожной магистрали. Использование системы К-60Т позволяло также перевести большую часть вторичных, организуемых по физическим цепям, на каналы ТЧ, что значительно повышало качественные показатели технологических видов связи и телеуправления.

Основные технические характеристики АСП, применяемых на кабельных линиях связи (КЛС) железных дорог России и стран СНГ, приведены в таблице 1.1.

Системой передачи К-60Т была закончена эпоха уплотнения симметричных кабелей с металлическими (медными) жилами системами АСП для железнодорожного транспорта, но проблема увеличения пропускной способности КЛС и помехоустойчивости в условиях повышенных помех от все расширяющейся электрификации железных дорог осталась. Поэтому были начаты исследования и разработка других направлений совершенствования и увеличения пропускной способности линий связи на железнодорожном транспорте в соответствии с наметившимися мировыми тенденциями.

Таким образом, к концу второй половины XX века максимальное число каналов ТЧ, которое можно было организовать по симметричным кабелям дальней связи, составляло 360–480 каналов ТЧ (см. таблицу 1.1), что не всегда удовлетворяло потребностям железных дорог.

Таблица 1.1 – Характеристики кабельных линий связи железных дорог

| Варианты КЛС и тип кабеля связи | Тип системы передачи | Количество систем передачи | Количество каналов связи | | | | Всего каналов | Удельный расход металла на 1 канал-км, кг/кан-км | |
|---------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|---------------|--------------|----|---------------|--|-----|
| | | | магистральной и дорожной | отделенческой | телемеханики | | | Cu | Al |
| | | | | | ТЧ | ТЧ | | | |
| Однокабельные линии | | | | | | | | | |
| КПАБ 7×4×1,05+5×2×0,7+1×0,7 | К12+12 | 4 | 36 | 12 | 12 | 3 | 63 | 4,0 | 6,4 |
| МКПАБ 7×4×1,05+5×2×0,7+1×0,9 | К12+12 | 10 | 108 | 12 | 12 | 2 | 143 | 3,3 | 3,9 |
| Двухкабельные линии | | | | | | | | | |
| МКПАБ 7×4×1,05+5×2×0,7+1×0,7 | К-60П | 6 | 360 | - | 16 | 10 | 386 | 1,3 | 2,1 |
| МКПАБ 7×4×1,05+5×2×0,7+1×0,7 | К-24Т | 2 | | | | | | | |
| | К-60П | 6 | 360 | 48 | 12 | 10 | 430 | 1,2 | 1,9 |
| Трехкабельные линии | | | | | | | | | |
| 2МКПАБ 4×4×1,05+5×2×0,7×1×0,7 | К-60П | 8 | | | | | | | |
| | К-12+12 | 4 | 480 | 48 | 10 | 5 | 543 | 1,5 | 2,2 |
| МКПАБ 7×4×1,5+5×2×0,7+1×0,7 | К-60П | 6 | | | | | | | |
| | К-24Т | 2 | 360 | 48 | 10 | 19 | 437 | 1,8 | 3,0 |
| 1СБПАБ 19×2×10 | | | | | | | | | |

1.4 Цифровые системы передачи

С середины 80-х годов прошлого столетия на железных дорогах начали внедряться многоканальные ЦСП с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ-30, ИКМ-120), обладающие рядом преимуществ по сравнению с АСП. Однако опыт применения первых ЦСП на железнодорожном транспорте показал, что они требуют иного подхода к использованию существующих симметричных КЛС, чем АСП. Так, при внедрении первых отечественных ЦСП необходимо было производить отбор кабельных пар по переходному затуханию для обеспечения работы АСП, на которые ЦСП оказывают мешающее влияние из-за совпадения части спектров их линейных сигналов и более высокого уровня цифровых сигналов на входе линии связи.

В условиях железнодорожного транспорта КЛС, уплотненные ЦСП подвергаются также воздействию импульсных помех, создава-

емых НЧ цепями ОТС и линейными цепями СЖАТ. На железнодорожных узлах и станциях ЦСП дополнительно подвергаются воздействию импульсных помех, создаваемых электромеханическими АТС, которые еще применялись на местных телефонных сетях связи. Именно эти причины явились сдерживающими факторами во внедрении ЦСП на железнодорожном транспорте.

Поэтому на железных дорогах ЦСП (ИКМ-30, ИКМ-120), в первую очередь, начали применять на местных сетях больших железнодорожных станций и узлов для организации соединительных линий, а на двухкабельных магистралях (МКС $4 \times 4 \times 1,2$; ЗКП $1 \times 4 \times 1,2$) – для организации каналов ТЧ отделенческой и дорожной телефонной связи (ИКМ-120). Обычно цифровые линии имеют небольшую протяженность и не образуют единую цифровую сеть из-за сложности их работы на участках с высоким уровнем помех, что является характерной особенностью КЛС железнодорожного транспорта. Эти трудности могут быть преодолены, но требуют высокой квалификации специалистов и проведения сложного комплекса организационно-технических мероприятий по обеспечению помехоустойчивости линейного тракта.

Однако даже при выполнении указанных условий, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы 1985–1994 гг. по созданию специализированных ЦСП («Цилиндр» и ИКМ-120Т), аналогичные по своим функциям АСП типа К-24Т, не дали положительных результатов. Поэтому, начиная с 1994 года, дальнейшие разработки специализированных ЦСП для организации каналов ТЧ первичных сетей связи дорожного и отделенческого уровней на симметричных КЛС железнодорожного транспорта были прекращены.

Для организации магистральной и дорожной связи с помощью систем передачи ИКМ-120 на линиях с кабелями типа МКПАШ целесообразна дополнительная прокладка отдельных кабелей (например, МКС и ЗКП), не имеющих источников импульсных помех, и, следовательно, потребовалось строительство трехкабельных магистралей.

1.5 Волоконно-оптические системы передачи

Наряду с попытками создания цифровых сетей связи на симметричных КЛС, в том числе и находящихся в эксплуатации, в 1985–1987 гг. впервые в СССР на участке Ленинград – Мга – Волховстрой Октябрьской железной дороги была спроектирована и построена

ВОЛП протяженностью 112 км. На этой ВОЛП использовались отечественные ВОК и специализированная аппаратура ЦСП ИКМ-120. При этом ВОК прокладывался непосредственно в грунт или кабельную канализацию, а аппаратура была установлена в существующих технических помещениях или узлах связи. Функциональные возможности аппаратуры ЦСП ИКМ-120 обеспечивали многократное выделение из вторичного цифрового линейного тракта 8,448 Мбит/с и ввод в линейный тракт первичного цифрового потока Е1 (2,048 Мбит/с) с последующим преобразованием его в спектр частот 30-канальной группы, то есть в отдельные цифровые каналы ОЦК-64 кбит/с и далее в каналы ТЧ.

Однако даже при выполнении указанных условий, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы 1985–1994 гг. по созданию специализированных ЦСП («Цилиндр» и ИКМ-120Т), аналогичные по своим функциям АСП типа К-24Т, не дали положительных результатов. Поэтому, начиная с 1994 года, дальнейшие разработки специализированных ЦСП для организации каналов ТЧ первичных сетей связи дорожного и отделенческого уровней на симметричных КЛС железнодорожного транспорта были прекращены.

Для организации магистральной и дорожной связи с помощью систем передачи ИКМ-120 на линиях с кабелями типа МКПАШ целесообразна дополнительная прокладка отдельных кабелей (например, МКС и ЗКП), не имеющих источников импульсных помех, и, следовательно, требуется строительство трехкабельных магистралей.

Существующие симметричные КЛС для работы АСП и ЦСП будут использоваться еще длительное время. По оценкам специалистов они будут составлять основу сетей связи еще ближайшие 15–20 лет, а на уровне местных сетей – 30 и более лет. Поэтому для повышения помехоустойчивости ЦСП в сетях доступа на КЛС используются современные методы обработки и кодирования сигналов. В частности, на ряде железных дорог уже имеется опыт применения модемов DSL (*Digital Subscriber Line* – цифровая передача данных по абонентским линиям). Наиболее распространены модемы HDSL (*High-Bit-Rate Digital Subscriber Loop* – высокоскоростная передача данных по абонентским линиям), которые обеспечивают на местных и низовых сетях связи работу по цепям с пониженными электрическими характеристиками и увеличенными длинами регенерационных

участков при высоком качестве передачи сигналов (коэффициент ошибок не более 10^{-9}).

Успешное выполнение работ по применению модемов HDSL будет способствовать устойчивому функционированию существующей сети связи МПС РФ и послужит хорошей предпосылкой для создания в будущем цифровых сетей связи на симметричных КЛС вместо аналоговых.

Мощным стимулом в создании цифровых сетей связи явилась разработка аппаратуры синхронной цифровой иерархии (*Synchronous Digital Hierarchy*) SDH/СЦИ. Первой магистральной цифровой линией SDH/СЦИ на РЖД и в России стала линия акционерного общества «Раском», построенная на участке С.-Петербург – Москва Октябрьской железной дороги протяженностью 680 км. Волоконно-оптический кабель содержит 28 волокон. На магистрали имеется 15 промежуточных пунктов, в которых первоначально были установлены синхронные мультиплексоры типа TN-1X фирмы Nortel Telekom. Они выполняют цифровую регенерацию линейного сигнала и ввод/вывод сигналов потока E1 (2,048 Мбит/с), которые используются в интересах дороги и МПС РФ и могут сдаваться в аренду другим пользователям.

Особенностью данной линии является подвеска оптического кабеля на опорах контактной сети железной дороги с применением специальных поддерживающих зажимов кабеля. Использование такой технологии позволило при сооружении линии подвешивать в среднем по 15–20 км оптического кабеля в сутки. Всё сооружение этой магистрали вместе с пусконаладочными работами оборудования заняло всего 4 месяца и было закончено в конце 1993 года.

При строительстве магистрали С.-Петербург – Москва были подтверждены высокие экономические и технологические характеристики данного метода создания ВОЛП, показывающие, что стоимость строительства «воздушных» КЛС оказывается почти в два раза ниже, чем подземных, а время сооружения сокращается примерно в 10 раз при квалифицированной подготовке организации работ.

Учитывая изложенное и возможности совершенствования технологии подвески ВОК на опорах контактной сети, позволяющие просто устранять повреждения кабеля при падении деревьев и опор вследствие его раскачивания от ветра и вибрации, высокую надежность

магистрала за счет резервирования линейного тракта по схеме 1 + 1, создания кольцевых структур ВОЛП или сетевого резервирования, МПС РФ в 1994 году были выполнены технико-экономические обоснования (ТЭО) целесообразности строительства цифровых сетей связи с подвеской кабеля на опорах контактной сети или высоковольтных линий автоблокировки на направлениях Москва – Новороссийск (2700 км) и Москва – Владивосток (9000 км).

Однако, несмотря на высокую технико-экономическую привлекательность проектов, практически разработанную организационную структуру управления работами по осуществлению идей и принципов, заложенных в проектах, их реализация по разным причинам была приостановлена вплоть до конца 1997 года.

Основываясь на положительном опыте применения и эксплуатации цифровых сетей связи местного уровня, созданных практически во всех регионах РЖД, строительства и эксплуатации магистрала SDH/СЦИ Москва – С.-Петербург и понимая невозможность дальнейшего совершенствования аналоговых сетей связи с использованием симметричных кабелей, а также учитывая мировую тенденцию перспективного развития сетей связи, конец 1994 года стал определяющим в принятии решения дальнейшего пути развития сетей связи железных дорог стран СНГ.

1.6 Системы спутниковой связи

Для удовлетворения в полной мере потребностей в дальней магистральной связи на железнодорожном транспорте СССР велись работы по разработке системы спутниковой связи (1991), которая обеспечивала бы передачу телеграфных, телефонных, телефаксных сообщений, а также передачу данных между вычислительными центрами железных дорог, в том числе в автоматизированной системе «Экс-пресс» (рисунки 1.1, 1.2).

Наземные оконечные станции спутниковой связи состоят из модулей, которые в зависимости от потребности позволяют производить их расширение и дополнение. Спутник связи обеспечивает связь с центром спутниковой связи (Центральной станцией связи МПС, г. Москва) и оконечными станциями железных дорог и отделений. От наземных станций потоки сообщений могут направляться дальше по наземным магистральным и дорожным системам передачи.

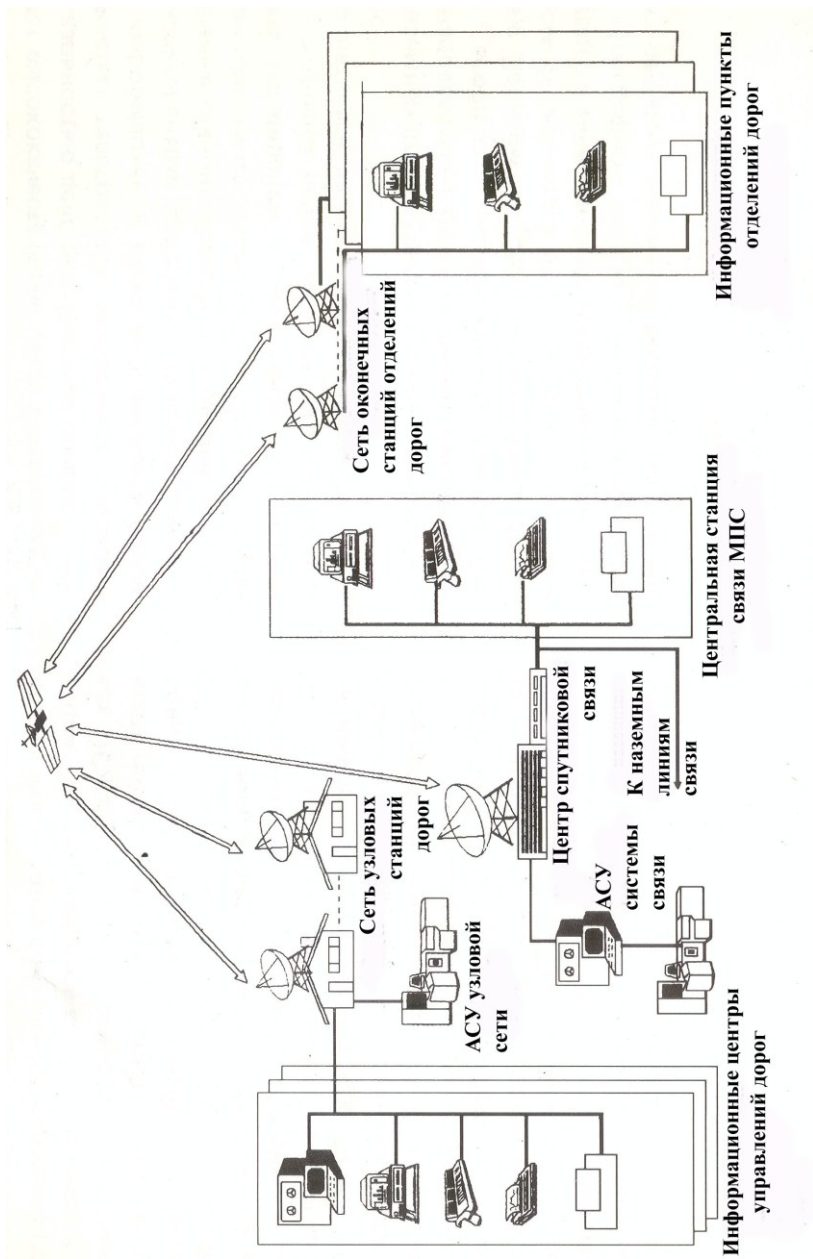


Рисунок 1.2 – Система спутниковой связи РЖД

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) – советская и российская спутниковая система навигации, разработана по заказу Министерства обороны СССР. Основой системы должны являться 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх орбитальных плоскостях с наклоном орбитальных плоскостей $64,8^\circ$ и высотой 19 100 км. Принцип измерения аналогичен американской системе навигации NAVSTAR GPS. В настоящее время развитием проекта ГЛОНАСС занимается Федеральное космическое агентство (Роскосмос) и ОАО «Российские космические системы».

Первый спутник ГЛОНАСС был выведен Советским Союзом на орбиту 12 октября 1982 года. 24 сентября 1993 года система была официально принята в эксплуатацию с орбитальной группировкой из 12 спутников. В декабре 1995 года спутниковая группировка была развернута до штатного состава – 24 спутника.

Вследствие недостаточного финансирования, а также из-за малого срока службы, число работающих спутников сократилось к 2001 году до 6.

В августе 2001 года была принята федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система», согласно которой полное покрытие территории России планировалось уже в начале 2008 года, а глобальных масштабов система достигла бы к началу 2010 года.

К 30 марта 2010 года количество работающих КА было доведено до 21 (плюс 2 резервных КА). С переходом на спутники «Глонасс-К» точность системы ГЛОНАСС станет сопоставимой с точностью американской навигационной системы NAVSTAR GPS – единственной зарубежной развернутой навигационной системой.

1.7 Переходный период линий и систем передачи железных дорог

В настоящее время идет широкое внедрение ВОЛС на железных дорогах стран СНГ. Поэтому в так называемое переходное время, от электрических КЛС к ВОЛС, на железных дорогах функционируют две сети связи: аналоговая телекоммуникационная сеть (АТКС) и вновь создаваемая цифровая телекоммуникационная сеть (ЦТКС). При этом обе сети организационно, технологически и технически жестко взаимоувязаны между собой и в совокупности представляют переходную аналого-цифровую сеть связи железнодорожного транспорта (АЦСС ЖТ). Типовая схема организации связи на участках железных дорог в переходный период приведена на рисунке 1.3.

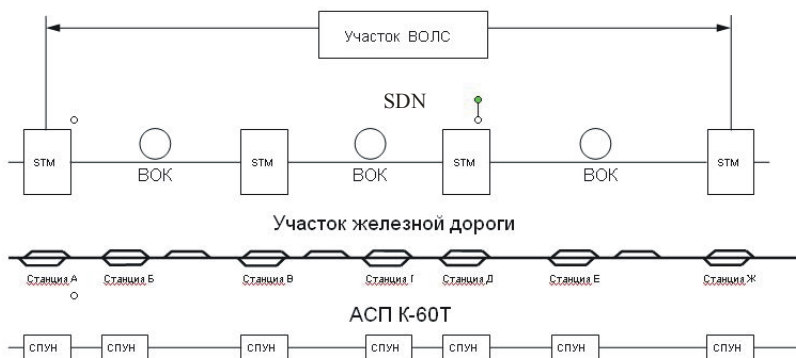


Рисунок 1.3 – Организация связи на участке железной дороги в переходный период с помощью АСП и ЦСП: СПУН – промежуточный необслуживаемый усилитель АСП; STM – синхронный транспортный модуль ЦСП

По электрическому кабелю с помощью многоканальной АСП типа К-24-Т или К-60-Т (кабельная транспортная система передачи соответственно на 24 или 60 каналов тональной частоты) или с помощью многоканальной ЦСП ИКМ-30 и ИКМ-120 (соответственно на 30 или 120 каналов тональной частоты) организованы каналы дорожных и отделенческих первичных сетей связи. Кроме того, по электрическому кабелю организуются цепи ОТС для оперативного управления работой инфраструктуры отдельных участков железной дороги (станций, дистанций сигнализации и связи, энергоучастков, локомотивных депо и др.), а также цепи СЖАТ, телеуправления и телесигнализации высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), автоблокировки (АБ), подстанций электрифицированных железных дорог и др.

Продолжительность начавшегося перехода к ЦСП и прекращение действия АСП будет зависеть от многих факторов, основными из которых являются разумное планирование и финансирование работ, связанных с дальнейшим внедрением ЦСП и ВОК, строительством новых линий связи на базе ВОК и постепенной заменой АСП на ЦСП.

При переходе на ВОК с помощью многоканальной аппаратуры систем передачи синхронной цифровой иерархии (SDH/СЦИ) и регенераторов организуются отделенческие, дорожные и магистральные ВОЛП. Сеть связи, на основе SDH/СЦИ, образует единую транспортную среду, позволяющую передавать и оперировать стандартными цифровыми потоками E1–E4, имеющую единую систему

управления и стандартные интерфейсы для подключения систем передачи, синхронизации и др.

В ближайшей перспективе, в связи с тем, что технология временного мультиплексирования SDH/СЦИ исчерпала свои возможности по пропускной способности, на первичной транспортной сети начала внедряться технология мультиплексирования по длине волны WDM (*Wave length Division Multiplexing*) (рисунок 1.4). Это позволяет получить практически неограниченную пропускную способность сети связи без прокладки дополнительного ВОК.

В перспективе ДЦСС полностью должна перейти на ВОК и цифровые системы передачи. Проблемным остается переход на ВОК низового уровня ЖАТС (так называемая проблема «последней мили»). На станциях и перегонах имеется много устройств, с которыми связь организуется по медным жилам кабелей связи и сигнальных кабелей с медными жилами, в том числе и магистральным кабелям дальней связи. Замена этих кабелей на оптические в ближайшие годы связана со многими теоретическими и техническими проблемами.

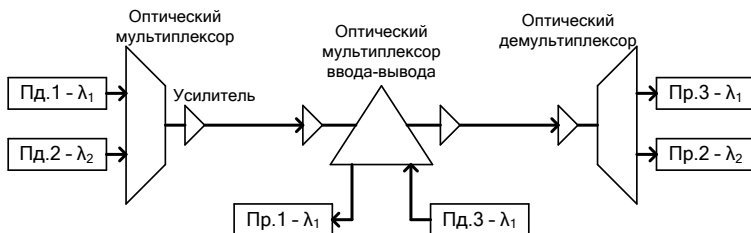


Рисунок 1.4 – Организация перспективной линии связи на участке железной дороги

Контрольные вопросы

- 1 Виды линий связи железнодорожного транспорта.
- 2 Многоканальные аналоговые системы передачи, преимущества и недостатки.
- 3 Многоканальные цифровые системы передачи, преимущества и недостатки.
- 4 Многоканальные волоконно-оптические системы передачи, преимущества и недостатки.
- 5 Системы спутниковой связи, преимущества и недостатки.
- 6 Особенности переходного периода в организации линий автоматики, телемеханики и связи.
- 7 Перспективы развития волоконно-оптических линий связи.

2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

2.1 Общие сведения

Оптическая связь, т. е. передача информации оптическими сигналами по открытому пространству, является самым древним, естественным, простым и понятным средством связи. Вспомним первый оптический телеграф.

Впервые передачу оптических сигналов по закрытому оптическому пространству в 1870 г. на заседании Лондонского Королевского общества показал физик Джон Тиндал (1820–1893). Он продемонстрировал непрямолинейное распространение света в струе жидкости, вытекающей из бокового отверстия в сосуде в виде ниспадающей параболы. Это объяснялось эффектом полного внутреннего отражения света, следствием законов отражения и преломления, сформулированных французом Рене Декартом (1596–1650) в «Диоптрике» еще в 1637 г. Несколько позже, в XIX в., эффект Тиндала наблюдали в тонких стеклянных нитях (волокнах). В 1930 г. по жгуту таких волокон было передано неподвижное изображение. Однако дальше этого физика не пошла, и эффект Тиндала в истории физики остался лишь опытом по распространению света в замкнутом пространстве с полным внутренним отражением.

Только в 1956 г. английский физик индусского происхождения Наринден Капани продемонстрировал тогдашнее «чудо техники» – волоконно-оптические жгуты, способные передавать свет. Тогда же заговорили о «волоконной оптике». Волоконно-оптические жгуты начали широко использовать для подсветки в труднодоступных местах, передачи изображений, их преобразования – в измерительной технике, приборостроении, медицине (эндоскопии). Заговорили о «новой эре в развитии оптики», о том, что «оптика вновь занимает «королевское положение в физике». И в этих хвалебных эпитетах ни слова об оптической связи. Почему? Все дело в том, что интенсивность света при распространении по жгуту (толстому стеклу) уменьшалась чуть ли ни вдвое на каждый метр жгута, и для того чтобы просветить такой жгут, требовался мощный источник света. Используемые тогда лампы накаливания были слишком маломощным источником света.

Решение проблемы мощного источника света началось с создания в 1960 г. американским исследователем Теодором Мейманом первого лазера на основе искусственного рубина. Однако он генерировал когерентное излучение лишь в виде редких импульсов и для связи практически не годился.

В 1964 году советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову, ставшим в последующие годы академиками, была присуждена Нобелевская премия по физике совместно с американским ученым Ч. Таунсом за изобретение оптического квантового генератора. Таким образом, была преодолена первая преграда в создании оптической связи.

Одним из участников исследований лазера в 1963–1966 гг. был и Жорес Иванович Алферов из физико-технического института им. академика А. Ф. Иоффе (г. Ленинград), который четко сформулировал и решил задачу о полупроводниковом гетеролазере, значительно превосходящим «обычный» лазер (арсенидогелиевый). В 1966 г. такой лазер им был практически реализован.

Пока шли работы по созданию лазеров, не прекращались исследования и с оптическим волокном. Продолжались работы по комплексным исследованиям, связанным с потерей энергии (затухания) в волокне и дисперсией луча света, являющихся основными показателями, препятствующими распространению сигналов на дальние оптические связи.

Затухание энергии сигналов при их передаче по первым волокнам было примерно 1000 дБ/км и ни о какой связи на ближние, а тем более на дальние расстояния не могло быть и речи. На таких волокнах можно было делать только межблочную передачу оптических сигналов. Для передачи сигналов на расстояния нескольких километров требовалось затухание волокна не более 20 дБ/км. За предшествующие полтора десятилетия прозрачность оптоволокну существенно увеличилась. Но работы продолжались и прорыв произошел. К 1972 г. получили волокна с затуханием 1,7 дБ/км (на волне $\lambda = 840$ нм), в 1977 г. – 0,13 дБ/км (на волне $\lambda = 1550$ нм).

Начиная с 1970 г. за рубежом началось интенсивное строительство ВОЛП для дальней многоканальной связи. В 1988 году был проложен оптический кабель на трансатлантической магистрали связи (ТАТ-8) через Атлантический океан. Экономическая эффектив-

ность трансатлантической ВОЛП по сравнению с кабельной магистралью ТАТ-1 с медными жилами характеризуется отношением 100 : 1.

2.2 Принцип передачи оптических сигналов по волокну

Принцип передачи оптических сигналов по линии связи рассмотрим на примере простейшей системы передачи информации.

Система состоит из передатчика оптических сигналов, ВОК и приемника оптических сигналов (рисунок 2.1). В передатчике (1) электрические сигналы $x(t)$, поступившие на его вход от источника сообщений, преобразуются в оптические сигналы $y(t)$. Для этого в передатчике имеется источник света (полупроводниковый светодиод или лазер) и оптический модулятор. С выхода передатчика оптические сигналы $y(t)$ вводятся в ОВ (2), распространяются по нему и поступают в приемник (3).

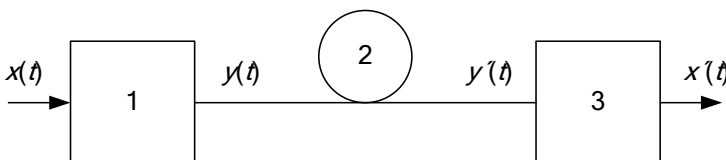


Рисунок 2.1 – Волоконно-оптическая система передачи сообщений:

1 – передатчик оптических сигналов; 2 – оптическое волокно; 3 – приемник оптических сигналов

В приемнике происходит преобразование модулированных оптических сигналов $y'(t)$ в электрические $x'(t)$. Для этого в приемнике имеется фотодетектор (*p-i-n* или лавинный фотодиод). Кроме фотодетектора в оптический приемник входят также усилители сигналов, демодулятор и другие элементы. На выходе приемника электрические сигналы $x'(t)$ должны быть тождественны сигналам $x(t)$, введенным в передатчик. Однако вследствие искажений оптических сигналов при их распространении по ОВ сигналы на входе $y(t)$ и выходе $y'(t)$ не всегда тождественны. Вследствие этого не тождественны также и сигналы $x(t)$ и $x'(t)$. Допустимая степень искажения как электрических $x'(t)$, так и оптических $y'(t)$ сигналов определяется назначением системы передачи информации.

2.3 Принципы построения волоконно-оптической линии связи

В системах передачи ОВ может быть использовано и для одно-, мало- и многоканальных односторонних (симплексных) или двусторонних (дуплексных) систем передачи. Для создания многих каналов связи и разделения направлений передачи может быть применено временное и частотное (волновое) разделения направления передач.

На рисунке 2.2 представлены примеры простейших однонаправленных двухканальных передач по одному ОВ. При частотном (волновом) разделении направлений передачи (см. рисунок 2.2, *а*) передатчик (1) содержит два источника излучения (при N -канальной связи – N источников излучения). Электрические сигналы $A_1, A_2, B_1, B_2, \dots$, поступающие на входы $A_{\text{вх}}$ и $B_{\text{вх}}$ передатчиков (1), преобразуются в оптические сигналы. Сигналы A_1, A_2, \dots передаются по ОВ (2), на длине волны λ_1 , а сигналы B_1, B_2, \dots – на длине волны λ_2 .

В фотоприемнике (3) пришедший по ОВ групповой оптический сигнал ($\lambda_1 + \lambda_2$) разделяется на два монохроматических пучка с длинами волн λ_1 и λ_2 . Затем в фотодетекторе пучок света длиной волны λ_1 преобразуется в электрические сигналы A_1, A_2, \dots , а с длиной волны λ_2 – в электрические сигналы B_1, B_2, \dots , которые поступают соответственно на выходы $A_{\text{вых}}$ и $B_{\text{вых}}$.

При передаче по одному ОВ оптических сигналов в двух направлениях (см. рисунок 2.2, *б*) передатчик (1) и фотоприемник (3) с фотодетекторами имеются на обоих концах ОВ (2). Причем передача сообщений в одном направлении происходит на волне λ_1 , а в обратном – на λ_2 .

При временном разделении направлений передачи сигналы передаются по одному ОВ поочередно, не совпадая по времени (см. рисунок 2.2, *в*). В случае двухканальной передачи на входы $A_{\text{вх}}$ и $B_{\text{вх}}$ передатчика (1) поступают две серии электрических импульсов A_1, A_2, \dots , и B_1, B_2, \dots , которые через распределитель поочередно вводятся в оптический передатчик.

Модулятор передатчика преобразует полученную последовательность электрических импульсов в оптические импульсы с одной длиной волны света λ_0 . Оптические импульсы, пришедшие по ОВ, преобразуются имеющимся в приемнике (3) фотодетектором в электрические импульсы, которые распределяются затем на две серии импульсов (A_1, A_2, \dots , и B_1, B_2, \dots), поступающих соответственно на

выходы $A_{\text{ВЫХ}}$ и $B_{\text{ВЫХ}}$ мощности) в самом волокне, а также потерь в соединениях строительной длины и оконечных разъемных соединителях в местах подключения аппаратуры. Кроме того, из-за несовершенства оптического тракта передачи происходят искажения оптических сигналов в целом. Поэтому для увеличения дальности связи в ВОЛП вдоль линейного тракта через определенные расстояния устанавливаются линейные оптические усилители или оптико-электронные регенераторы (рисунок 2.3).

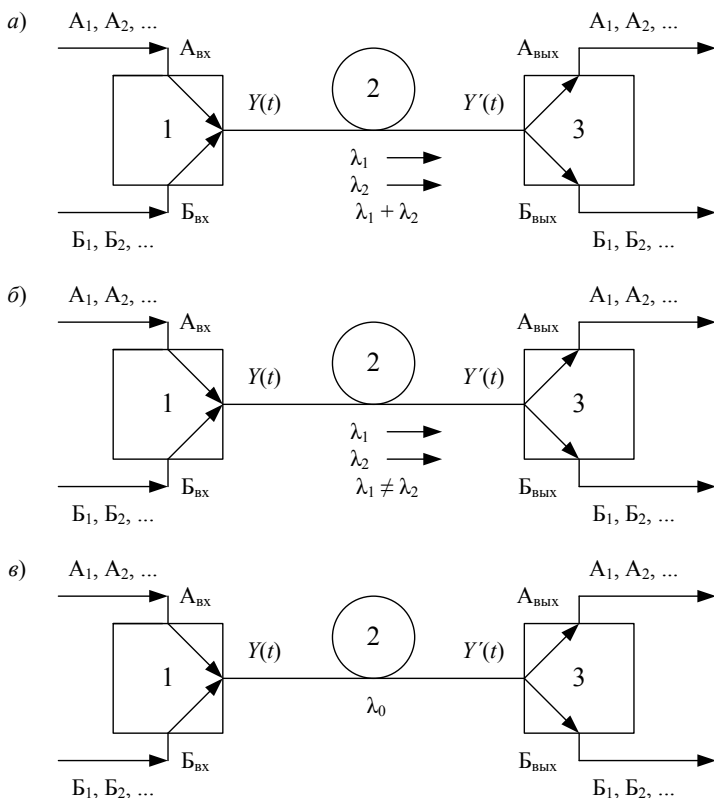


Рисунок 2.2 – Волоконно-оптическая линия передачи: *а* – односторонняя (симплексная) передача с волновым (частотным) разделением каналов; *б* – двусторонняя (дуплексная) передача с частотным разделением каналов; *в* – односторонняя передача с временным разделением каналов; *г* – двусторонняя передача с временным разделением каналов

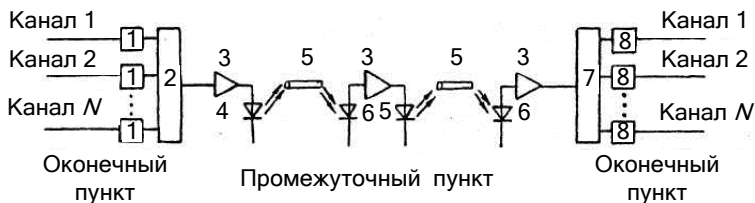


Рисунок 2.3 – Структурная схема ВОЛП с оптическими усилителями:
 1 – кодирующее устройство (модулятор); 2 – устройство объединения канальных сигналов (транспондер, мультиплексор); 3 – оптический усилитель; 4 – источник излучения света (лазер, светодиод); 5 – приемник света (фотодиод); 6 – усилитель электрических сигналов; 7 – устройство разьединения оптических сигналов; 8 – декодирующие устройства

В оптическом усилителе поступившие на его вход оптические сигналы с накопленными линейными искажениями будут усилены и на его выходе появятся такие же искаженные сигналы, у которых за счет усиления будут более высокие уровни сигналов, но, кроме того, появятся дополнительные искажения за счет собственных шумов оптического усилителя.

Простейшие оптико-электронные регенераторы, чтобы восстановить оптические сигналы линейного тракта ВОЛП, принимают их с волокна, преобразуют в электрические сигналы, усиливают, восстанавливают (корректируют) форму их сигналов, преобразуют усиленные электрические сигналы снова в оптические и передают дальше по волокну линии связи (рисунок 2.4). В регенераторе все накопленные в линейном тракте искажения устраняются и с выхода регенератора в волокно поступает такой же сигнал как с выхода передатчика.

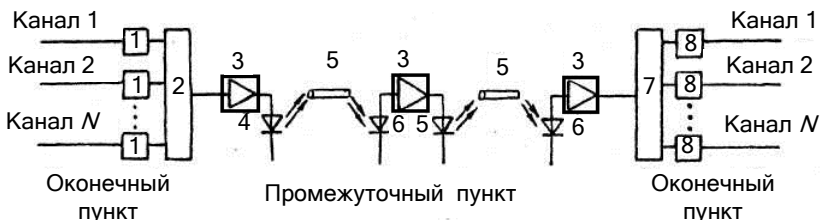


Рисунок 2.4 – Структурная схема ВОЛП с регенераторами:
 1 – кодирующее устройство (модулятор); 2 – устройство объединения канальных сигналов (транспондер, мультиплексор); 3 – оптический регенератор; 4 – источник излучения света (лазер, светодиод); 5 – приемник света (фотодиод); 6 – приемник света (фотодиод); 7 – устройство разьединения оптических сигналов; 8 – декодирующие устройства

Участки линии связи между двумя соседними регенераторами или усилителями получили название элементарных кабельных участков (ЭКУ).

В настоящее время ВОЛС получили широкое распространение на железных дорогах для организации различных видов связи, передачи данных, телеуправления, телесигнализации и др. Для передачи информации в ВОЛП применяют, как правило, системы с временным методом разделения каналов с использованием технологий плезиохронной цифровой иерархии (Plesiochronous Digital Hierarchy) PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ. В последние годы внедряется также система с частотным (волновым) методом разделения цифровых каналов.

Первичный цифровой канал (ПЦК) системы передачи имеет скорость 2048 кбит/с (или приблизительно 2 Мбит/с). Далее, путем последовательного каскадного мультиплексирования (используются мультиплексоры типа 4 : 1), формируются каналы 2–5-го уровней иерархии со скоростями передачи 8,448; 34,368; 139,264 и 564,992 Мбит/с (или приблизительно 8; 34; 140 и 565 Мбит/с). Такая иерархия систем позволяет организовать соответственно 30, 120, 480, 1920 и 7680 каналов тональной частоты.

Контрольные вопросы

- 1 Принципы многоканальной передачи по оптическому волокну.
- 2 Основные элементы волоконно-оптических систем передачи.
- 3 Способы увеличения дальности передачи оптических сигналов.

3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

3.1 Общие сведения

Оптическое волокно (ОВ) – диэлектрический волновод оптического диапазона частот, которое представляет собой цилиндрические нити (волокна) или тонкие узкие прозрачные полоски, изготовленные из материала, прозрачного для применяемого оптического излучения.

Цилиндрические ОВ применяются в основном как волноводы ВОЛП для линий связи протяженностью от сантиметров до сотен и тысяч километров, а ОВ в виде полосок (планарные) – как соединительные элементы в оптических и оптоэлектронных микросхемах. В дальнейшем будем рассматривать только цилиндрические ОВ, нашедшие широкое применение в ВОЛП.

Основу ВОК составляют ОВ, которые выполняют функции среды распространения световых электромагнитных волн. Оптические волокна – круглые стержни из оптически прозрачного диэлектрика (кварцевого стекла), структура которых обеспечивает передачу световых электромагнитных волн (рисунок 3.1).

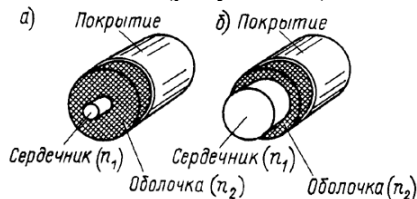


Рисунок 3.1 – Виды оптического волокна:
 а – одномодовое; б – многомодовое

Оптическое волокно состоит из однородного сердечника с радиусом r и отражающей оболочки (рисунок 3.2). Сердечник – светопроводящая часть с показателем преломления n_1 , большим, чем показатель преломления n_2 отражающей оболочки ($n_1 > n_2$). Такое ОВ называют ступенчатым (слоистым, дискретным), потому что в нем на границе «сердечник – отражающая оболочка» профиль показателя преломления изменяется скачком на величину $(n_1 - n_2)$ (см. рисунок 3.2, а, в).

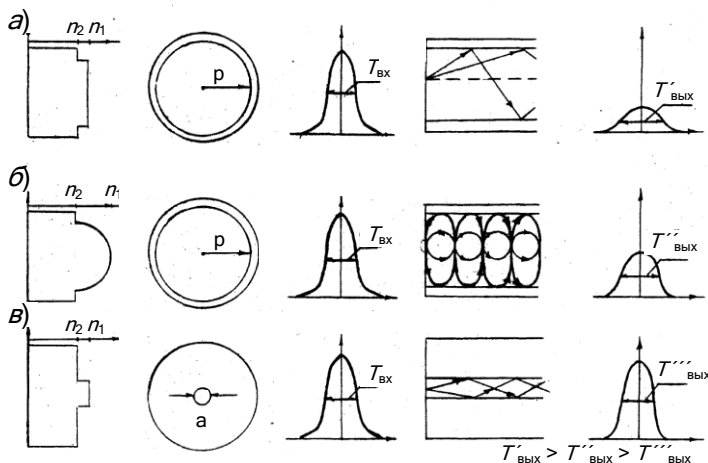


Рисунок 3.2 – Структура, профиль и импульсные характеристики оптических волокон: а – многомодовый ступенчатый профиль; б – многомодовый градиентный профиль; в – одномодовый ступенчатый профиль

Попадая в световедушую сердцевину, свет распространяется в ней за счет эффекта полного внутреннего отражения. Этот эффект имеет место при падении луча света на границу раздела двух сред из среды с большим показателем преломления n_1 в среду с меньшим показателем n_2 , и наблюдается только до определенных значений угла падения $\theta_{кр}$, величина которого определяется показателями n_1 и n_2 .

Профилем называют зависимость между показателем преломления и расстоянием от центральной оси. Кроме ОВ со ступенчатыми профилями применяют волокна с градиентным – плавным профилем (см. рисунок 3.2, б).

Основные требования, предъявляемые к ОВ: наибольшая прозрачность для излучения в требуемом диапазоне длин волн; высокая стойкость против изменения структуры и свойств с течением времени; высокая сопротивляемость влиянию внешних дестабилизирующих воздействий, особенно воды.

3.2 Передача оптических сигналов по волокну

В общем случае процесс передачи сигналов по ОВ описывается с помощью математического аппарата электродинамики. Основные закономерности распространения (типы волн, взаимодействие между ними, условия распространения) могут быть получены из решения системы уравнений электромагнитного поля Максвелла

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}; \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon \frac{d\vec{E}}{dt}, \quad (3.2)$$

в предположении линейного изотропного материала с

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (3.3)$$

В этих уравнениях \vec{D} и \vec{E} – векторы индукции и напряженности электрического поля; \vec{B} и \vec{H} – векторы индукции и напряженности магнитного поля; ε и μ , – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала.

Система уравнений (3.1–3.3) сводится к волновым уравнениям в векторной форме

$$V^2 \vec{E} + (k^2 - \beta^2) \vec{E} = 0, \quad (3.4)$$

$$V^2 \vec{H} + (k^2 - \beta^2) \vec{H} = 0, \quad (3.5)$$

где $k = 2\pi \frac{n_1}{\lambda}$ – волновое число, β – коэффициент продольного распространения колебаний в ОВ.

Решение волновых уравнений существует для дискретных значений типов волн или мод, обозначаемых HE_{lm} и EH_{lm} . Числа l и m в индексе обозначают число изменений поля по диаметру и периметру ОВ. Для каждой моды существует критическая частота или частота отсечки, ниже которой поле не распространяется вдоль ОВ, а вся энергия рассеивается в окружающем пространстве. Существует только одна мода (HE_{0l}), для которой частота отсечки равна нулю. Критические частоты мод высшего порядка определяются корнями функций Бесселя от аргумента $x = \sqrt{k^2 - \beta^2} \cdot \rho$, удовлетворяющих решению волновых уравнений (3.4) и (3.5). Первый нуль функции Бесселя $I_0(x)$ существует при $x = 2,405$. Следующие нули функции Бесселя имеют место при больших значениях x .

Важнейшей характеристикой ОВ, играющей роль аргумента функции Бесселя и определяющей существование различных мод, является волноводный параметр или волноводная нормированная частота

$$v = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3.6)$$

где ρ – радиус сердечника, λ – длина волны света в вакууме. При выполнении условия

$$v = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad (3.7)$$

в ОВ существует только одна мода. С увеличением радиуса сердечника и уменьшением длины волны число мод увеличивается и может быть определено по формуле

$$k = \left(\frac{2\pi\rho}{\lambda} \right)^2 n_1 (n_1 - n_2). \quad (3.8)$$

В зависимости от волновых свойств ОВ их разделяют на два основных типа: одномодовые и многомодовые. Многомодовые волокна со ступенчатым или градиентным профилем способны передавать сотни и тысячи мод и диаметр сердечника составляет 20–200 мкм. Одномодовые волокна имеют диаметр сердечника 1–8 мкм и количество распространяющихся мод по ним $N = 1$. В последние годы появились маломодовые ОВ, число мод в которых не превышает 100.

Снаружи ОВ покрывают защитной оболочкой, оптические свойства которой принимают во внимание лишь в случаях поглощения лучей, по тем или иным причинам вышедшим из оптического волокна (например, вследствие микротрещин на волокне).

3.3 Многомодовое оптическое волокно

Многомодовые ОВ используются главным образом в линиях внутриобъектовой связи. Многомодовые ОВ со ступенчатым показателем преломления обычно имеют диаметр сердечника 50–120 мкм. Показатель преломления отражающей оболочки отличается от показателя преломления в сердечнике на 1–10 %. Такие световоды применяют в системах передачи на малые расстояния с полосой пропускания до 100 Мбит/с·км.

Многомодовые градиентные ОВ изготавливаются с диаметром сердечника 20–70 мкм и относительной разностью показателей преломления отражающей оболочки и сердечника 0,7–3 %. Они используются в системах передачи небольшой протяженности с полосой пропускания до 1 Гбит/с·км.

Маломодовые ОВ также применяются на линиях связи небольшой протяженности и по сравнению с многомодовыми они обеспечивают более высокое качество передачи.

Наибольшая дальность связи и широкополосность (10 Гбит/с·км) достигается в одномодовых ОВ, диаметр сердечника которых составляет от 3 до 10 мкм.

3.4 Одномодовое оптическое волокно

Одномодовые ОВ изготавливаются по очень сложной технологии, требуют узконаправленных когерентных источников света – квантовых генераторов (лазеров). В многомодовые ОВ свет может вводиться

от сравнительно простых источников света – полупроводниковых.

Внешний диаметр оптического волокна составляет 100–150 мкм. При этом толщина периферийной части многомодового ОВ не должна быть меньше 20 мкм для уменьшения потерь из-за туннелирования.

Волокно NZDSF, известное также как λ -смещенное волокно, было специально разработано для работы с мультиплексным оптическим сигналом. Использование такого волокна позволяет за счет сдвига длины волны нулевой дисперсии λ_0 улучшить подавление эффекта четырехволнового смешивания и в то же время поддерживать распространение сигнала высокой емкости на большие расстояния.

В ВОЛС цифровой сети железнодорожного транспорта применяются два типа волокна: *True Wave RS* фирмы *Lucent Technologies* и LEAF™ фирмы *Corning*. По своим дисперсионным характеристикам волокна имеют близкие параметры (таблица 3.1).

Конкретные длины регенерационных участков зависят не только от типа оптического волокна, но также от характеристик применяемого оборудования и архитектуры системы передачи (с оптическими усилителями или без них, с применением спектрального уплотнения и пр.).

В настоящее время в мировой практике нашли широкое применение системы с волокном NZDSF (волокно *True Wave RS* фирмы *Lucent Technologies*, LEAF™ фирмы *Corning*). Они позволяют обеспечить передачу потоков $16 \times 2,5$ Гбит/с. Кроме того, уже испытаны системы с большей производительностью ($n \times 10$) Гбит/с (n до 80). Практикой подтверждено, что компенсация дисперсии волокна NZDSF при скорости передачи выше 10 Гбит/с требуется только при длине участков больше 300 км (без LR, но с EDFA).

Таблица 3.1 – Оптические характеристики волокон SF и NZDSF

| Параметр | Тип волокна | | |
|--|---|---|---|
| | Стандартное волокно G.652 (мировой уровень) | Волокно True Wave® RS (Lucent Technologies) | Волокно All-Wave™ (Lucent Technologies) |
| Коэффициент затухания (максимальное значение), дБ/км | 0,36 (1310 нм) 0,22–0,25 (1550 нм) | 0,36 (1310 нм) 0,22–0,25 (1550 нм) | 0,34 (1310 нм) 0,19–0,23 (1550 нм) 0,31 (1385 нм) |
| Дисперсия, пс/(нм · км) | <3,5 (1310 нм) <20 (1550 нм) | 2,6–6,0 (1550 нм) | |
| ПМД, пс/нм/м (в кабеле) | - | <0,05 | <0,05 |

Окончание таблицы 3.1

| Параметр | Тип волокна | | |
|---|---|---|--|
| | Стандартное волокно G.652 (мировой уровень) | Волокно True Wave® RS (Lucent Technologies) | Волокно All-Wave™ (Lucent Technologies) |
| Диаметр модового поля, мкм | (8,6–9,5)±10 % (1310 нм) | 8,4±0,6 (1550 нм) 8,7±0,6 (1600 нм) | 9,2±0,4 (1310 нм) 10,5±1,0 (1310 нм) |
| Неконцентричность модового поля, мкм | <0,8 | <0,6 | <0,5 |
| Рабочий диапазон длин волн, нм | ~1275–1310 ~1525–1575 | ~1500–1620 | ~1275–1375 |
| Максимальная длина регенерационного участка, км | 1000 (2,5 Гбит/с) 60 (10 Гбит/с) 3 (40 Гбит/с) | 600 (2,5 Гбит/с) 400 (10 Гбит/с) 25 (40 Гбит/с) | 1000 (2,5 Гбит/с) 60 (10 Гбит/с) (1550 нм) Дополнительно: 2000 (2,5 Гбит/с) 120 (10 Гбит/с) (1400 нм) |
| Основное применение | Зоновые, городские и местные системы передачи TDM диапазона 1310 нм. Магистральные, зонные и городские системы передачи технологии SDH/СЦИ до 2,5 Гбит/с, включая системы DWDM в диапазоне 1525–1575 нм | Магистральные системы передачи TDM, WDM, DWDM, Гбит/с: 2,5; 10; 40. Техничко-экономически эффективно и рекомендуется для систем DWDM, Гбит/с: (140)х10; (180)х2,5 | Зоновые, городские и местные системы технологии SDH/СЦИ до 2,5 Гбит/с, включая системы DWDM в диапазоне 1525–1575 нм, а также системы передачи различного назначения в диапазонах 1310 и 1400 нм. Экономически эффективно для городских и зонных сетей |

3.5 Технология изготовления оптического волокна

Технология изготовления ОВ состоит из следующих четырех процессов: получение исходных веществ высокой чистоты; синтез из них стеклообразных материалов; формирование из последних исходных заготовок; преобразование заготовок в оптическое волокно.

В качестве исходных в основном используются следующие материалы:

– оксидные стекла: кварцевые, в том числе легированные (для $\lambda = 0,8 \dots 1,8$ мкм);

- многокомпонентные на силикатной основе (для $\lambda = 0,8 \dots 0,9$ мкм) или многокомпонентные типа германатных (для $\lambda = 1,6 \dots 4,5$ мкм);
- бескислородные многокомпонентные стекла (для $\lambda = 2 \dots 20$ мкм);
- моно- и поликристаллические вещества (для $\lambda = 2 \dots 20$ мкм);
- полимеры, жидкость и иногда газообразные среды.

Стекло – это аморфное тело, состоящее из элементов и химических соединений, которые встречаются и в кристаллическом состоянии. Однако структура стекол существенно отличается от структуры кристаллов. В последних положения отдельных атомов четко зафиксированы в пространстве в соответствии с регулярной кристаллической решеткой (например, плавленый кварц состоит из SiO_4 -тетраэдров). В многокомпонентных стеклах образуются нерегулярные решетки, что приводит к изменениям их характеристик (понижается температура размягчения и температура плавления и др.). Плавленый кварц с его относительно сильно связанной кристаллической решеткой SiO_4 -тетраэдров плавится при температуре около 2000°C . В то время как натриево-кальциево-силикатные (Na_2O , CaO , SiO_2), щелочно-свинцово-силикатные (Na_2O , PbO_2 , SiO_2), натриево-алюмосиликатные (Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2) стекла плавятся при температуре около $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$. Еще ниже температура плавления в натриево-боросиликатных стеклах (Na_2O , B_2O_3 , SiO_2) – $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$. Относительно низкие температуры плавления многокомпонентных стекол упрощают технологию изготовлений из них ОБ по сравнению с кварцевыми стеклами.

Полимерные ОБ изготавливаются из стеклообразных органических высокомолекулярных полимеров, которые придают ОБ пластичность. К таким материалам относятся: полиметилметакрилат, полистирол, сополимер полиметилметакрилата, диаллиловый эфир, мономер винила, метилакрилат, фторполимеры и др.

В полимерных ОБ один из материалов используется для изготовления сердечника, а другой – в качестве светоотражающей оболочки. Такие ОБ предназначены для работы в видимой части спектра, так как за ее пределами в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной зонах ослабление света в используемых полимерах резко увеличивается и эффективность применения ОБ снижается.

Для изготовления ОБ применяется несколько способов, одним из которых является вытягивание волокна из расплава стекол через

фильеру (тонкое отверстие) и вытягивание волокна из размягченного комплекта штабик-трубка и др.

Простейший из них – тигельно-фильерный (двойных тигелей) способ вытягивания ОВ из расплава стекол (рисунок 3.3). При этом способе используют огнеупорный и стеклоустойчивый двойной тигель – для стекла сердечника (2) и стекла оболочки (3), установленных концентрически и строго вертикально. Причем внутренний тигель (2) тщательно центрируется относительно внешнего (3) и располагается на несколько сантиметров выше. После размягчения в электропечи (1) обоих стекол до необходимой вязкости из внутренней фильеры стекло сердечника начинает вытекать и плавиться в поток стекла оболочки, вытекающей из кольцевой наружной фильеры. В результате формируется двойной поток стекла со ступенчатым (квазиступенчатым) профилем показателя преломления (5), который охлаждается и наматывается на бобину (6).

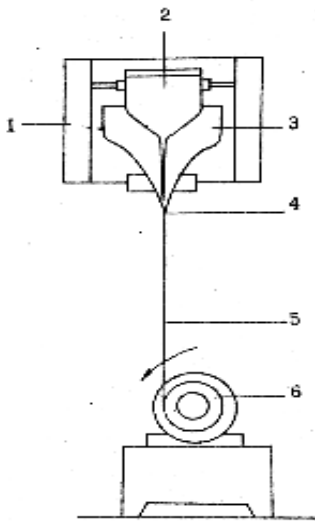


Рисунок 3.3 – Схема вытягивания оптического волокна:

1 – электропечь; 2 – тигель для стекла сердечника; 3 – тигель для стекла отражающей оболочки; 4 – фильеры; 5 – оптическое волокно; 6 – приемная бобина для намотки оптического волокна

Тигельно-фильерный способ прост и хорошо автоматизируем. Он позволяет изменять геометрические размеры и химический состав ОВ. Однако из-за неизбежного загрязнения расплавленного стекла примесями в тигле невозможно получить ОВ с очень хорошими параметрами. Изготовленные по подобной технологии ОВ имеют потери – свыше 10 дБ/км и полосу пропускания до 300 кГц/км.

Лучшие параметры имеют ОВ, изготовленные способом осаждения из газовой фазы. При этом методе мелкодисперсный порошок из оксидов соответствующих примесных элементов, образующихся в результате реакции в пламени газовой горелки или лазера, осаждается на опорную трубку из кварцевого стекла. Осаждение можно производить на внутреннюю сторону трубки или на внешнюю сторону стержня.

Внутреннее осаждение обеспечивает сверхчистые условия протекания химических реакций, что позволяет получить ОВ с минимальными потерями, достигающими 0,2 дБ/км и менее. Недостаток способа – ограниченная несколькими километрами длина опорной трубки, не позволяющая получить длинные ОВ.

Внешнее осаждение позволяет получить ОВ длиной до 20 км с градиентным профилем и потерями около 0,5 дБ/км, а также одномодовые ОВ длиной до 100 км и потерями порядка 0,30 дБ/км.

В процессе производства ОВ производится также контроль и измерение его конструктивных параметров, которое состоит в определении диаметров сердцевины и оболочки на всем протяжении оптического волокна. При этом также контролируется отклонение сечения ОВ от концентрической формы.

Измерение изменения диаметра ОВ по его длине осуществляется в процессе вытяжки ОВ с помощью лазерной системы. Сигнал датчика контроля диаметра ОВ управляет скоростью вытяжки, а также выдает информацию о величине отношения диаметров b/a . Измерение отклонений сечения от концентрической формы на концах производится визуально с применением микроскопа со специальной измерительной сеткой.

Контрольные вопросы

- 1 Профили оптических волокон.
- 2 Конструктивные особенности оптического волокна.
- 3 Одно-, мало- и многомодовых оптические волокна, структура и профиль.
- 4 Особенности распространения сигналов по оптическим волокнам.
- 5 Материалы для изготовления оптических волокон.
- 6 Методы изготовления оптических волокон.

4 ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

4.1 Распространение оптических сигналов по волокну

Процессы распространения оптического сигнала в ОВ могут быть достаточно точно описаны законами геометрической оптики. На основе этих законов рассмотрим процесс передачи света по многомодовому ОВ со ступенчатым профилем.

Из закона Снелля известно, что на границе двух сред с различными показателями преломления луч света меняет свое направление. Изменение направления луча (рисунок 4.1) описывается соотношением

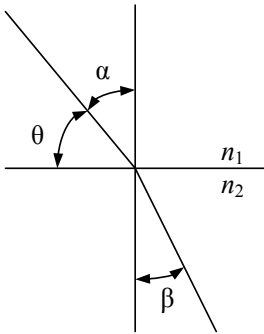
$$n_1 \sin \alpha = n_0 \sin \beta. \quad (4.1)$$

Так как $\sin \beta \leq 1$, то свет проникает в другую среду, если угол падения α меньше критического угла α_c , для которого справедливо неравенство

$$\sin \alpha_c < \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.2)$$

В противном случае световой луч полностью отражается от границы сред. Максимальный угол Θ , при котором происходит полное отражение луча, называется критическим углом скольжения:

$$\Theta_c = \arccos \frac{n_2}{n_1} = \arcsin \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}}. \quad (4.3)$$



В терминах углов скольжения условие полного внутреннего отражения

$$\Theta < \Theta_c; \quad \sin \Theta < \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}}. \quad (4.4)$$

Рисунок 4.1 – Преломление на границе раздела двух сред

Лучи, распространяющиеся в сердечнике ОВ и испытывающие полное внутреннее отражение от границы раздела сердечника и отражающей оболочки, называются направляемыми.

Проанализируем более подробно процесс распространения меридионального луча в цилиндрическом ОВ со ступенчатым профилем. Пусть на плоский торец сердечника ОВ от внешнего источника падает луч света с углом падения достаточно острым, чтобы произошло его преломление, т. е. проникновение луча в сердечник. Из закона Снелля –

$$n_0 \sin \beta = n_1 \sin \Theta, \quad (4.5)$$

где n_0 – показатель преломления в воздухе, который можно считать равным единице. Следовательно,

$$\sin \Theta = \frac{\sin \beta}{n_1}. \quad (4.6)$$

Учитывая условие полного внутреннего отражения в световоде (4.4), получаем

$$\sin \beta \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4.7)$$

Из полученного выражения следует понятие апертуры оптической системы как предельного угла между крайними лучами конического пучка света, который может быть канализирован в ОВ:

$$A = 2\beta = 2 \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.8)$$

и более часто используемое понятие числовой апертуры:

$$NA = \sin \beta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4.9)$$

Введя обозначение относительной разности квадратов показателей преломления

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}, \quad (4.10)$$

которая для близких значений n_1 и n_2 с достаточной для практики точностью может быть вычислена по формуле

$$\Delta \approx 1 - \frac{n_2}{n_1}, \quad (4.11)$$

получим

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (4.12)$$

Определим длину пути l направляемого меридионального луча в ОВ как функцию от угла скольжения Θ :

$$l = \frac{L}{\cos \Theta}, \quad (4.13)$$

где L – длина ОВ.

Принимая во внимание, что скорость света в сердечнике v ОВ и скорость света в вакууме c связаны соотношением

$$v = \frac{n_1}{c}, \quad (4.14)$$

установим, что время прохождения луча по ОВ нелинейно зависит от угла скольжения:

$$t = \frac{n_1 L}{c \cos \Theta}. \quad (4.15)$$

Минимальное время прохождения

$$t_{\min} = \frac{n_1}{c} L \quad (4.16)$$

имеет луч, параллельный оси ОВ, а максимальное

$$t_{\max} = \frac{n_1^2 L}{c n_2} \quad (4.17)$$

– луч, падающий на границу раздела сред в ОВ с критическим углом скольжения.

В итоге сколь угодно короткий импульс, пройдя через ОВ, получит уширение, т. е. растянется во времени на величину

$$\Delta t_{\text{л}} = t_{\max} - t_{\min} = \frac{n_1 L}{n_2 c} (n_1 - n_2). \quad (4.18)$$

Эффект уширения импульса света из-за разного времени прохождения лучей в ОВ известен как лучевая дисперсия. Чем меньше лучевая дисперсия, тем с большей скоростью (частотой) могут следовать импульсы по ОВ, и оптическая система передачи будет иметь большую пропускную способность. Поэтому в оптических кабелях связи применяют слабонаправленные ОВ, показатели преломления которых в сердечнике и отражающей оболочке отличаются незначительно. Типичные значения относительной разности показателей преломления лежат в пределах 0,01–0,03. При таких значениях Δ ОВ из кварцевого стекла с показателем преломления сердечника $n_1 = 1,46$

имеет числовую апертуру $NA = 0,21 \dots 0,25$. Максимальный угол при вершине конуса света, канализируемого по ОВ, составит $24,2\text{--}30,0^\circ$.

В градиентных JD стремятся реализовать такую зависимость между показателем преломления в сердечнике n_1 и расстоянием от центра ОВ r , при которой все направляемые лучи проходят ОВ за время, не зависящее от угла падения на плоскую поверхность торца сердечника.

Теоретически все меридиональные лучи имеют одинаковое время прохождения при гиперболическом секансном профиле

$$n(r) = n_1 \operatorname{sech} \left(\sqrt{2\Delta} \frac{r}{\rho} \right). \quad (4.19)$$

Время прохождения косых лучей при гиперболическом секансном профиле не выравнивается. Более того, справедливо утверждение, что для волоконных ОВ не существует такого профиля, при котором происходило бы полное выравнивание времени прохождения всех направляемых лучей.

Наименьший практически достижимый разброс времени прохождения лучей обеспечивают градиентные ОВ с профилем, близким к параболическому:

$$n^2(r) = n_1^2 \left(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{\rho} \right)^2 \right). \quad (4.20)$$

Траектории меридиональных направляемых лучей в градиентном световоде имеют вид синусоиды, траектории косых направляющих лучей вычерчивают винтовую кривую.

Кроме лучевой дисперсии, которую также называют модовой, существенное влияние на уширение импульса оказывает дисперсия материала, обусловленная зависимостью показателя преломления материала, из которого изготовлен сердечник ОВ, от длины волны света. Так как все известные источники излучают свет с ненулевой шириной спектральной линии, различные составляющие спектра в ОВ распространяются с разной скоростью. Соответствующее уширение импульса определяется по формуле

$$\Delta t_m = \frac{L\lambda}{c} \left| \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right| \Delta\lambda, \quad (4.21)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии источника света.

В реальных ОВ имеется также волноводная (структурная) дисперсия t_b , обусловленная влиянием на сигнал геометрической структуры волокна.

Общая дисперсия

$$t_0 = \sqrt{t_d^2 + t_x^2}, \quad (4.22)$$

где $t_x = t_m + t_b$ – дисперсия групповой задержки, зависящая от длины волны и называемая хроматической дисперсией.

Уширение импульсов тем больше, чем длиннее линия. Наибольшее влияние на уширение импульсов оказывает лучевая (модовая) дисперсия, которая обусловлена тем, что различные лучи распространяются по волокну под разными углами, проходят различные пути и появляются на конце линии в разные моменты времени. Лучевая дисперсия больше проявляется в многомодовых ОВ. Для одномодовых ОВ лучевая дисперсия существенно меньше.

С дисперсией связан также такой показатель ОВ, как полоса пропускания, – параметр, характеризующий диапазон частот оптического сигнала, передаваемого через ОВ без существенных искажений и определяемый как верхняя частота сигнала, при которой его амплитуда в ОВ заданной длины уменьшается на 3,0 дБ. Ширина полосы пропускания измеряется в МГц/км. Аналитически полоса пропускания и дисперсия ОВ связаны соотношением

$$\Delta F = \frac{1}{t_0}. \quad (4.23)$$

С учетом примерных значений дисперсий для много- и одномодового ОВ получим, что полосы пропусканий их ограничены соответственно частотами 100 и 10000 МГц/км.

Преимуществом одномодовых ОВ является возможность минимизации дисперсии в широком диапазоне длин волн. Нулевая дисперсия может быть смещена в область длин волн 1,5–1,6 мкм, где затухание ОВ минимально.

Полоса пропускания одномодового ОВ на длине волны минимальной дисперсии существенно зависит от ширины спектра излучения источника света. При спектральной ширине полосы излучения 5 нм максимальное значение широкополосности составляет не менее 200 ГГц/км.

Значительные преимущества по широкополосности и дальности передачи одномодовых ОВ по сравнению с многомодовыми привели к тому, что многомодовые оптические кабели за рубежом практически не выпускаются.

Описание уширения импульса как максимального временного разброса $t_{\max}-t_{\min}$ недостаточно, если при передаче необходимо получить информацию о форме импульса. В этом случае пользуются понятием "импульсный отклик". Под импульсным откликом понимают импульс на выходе световода при передаче на вход импульса, описываемого δ -функцией Дирака. Поскольку такой импульс имеет продолжительность $T \rightarrow 0$ и конечную мощность, то при произвольном входном импульсе выходной импульс может быть определен с помощью свертки.

Количественно импульсный отклик описывает распределение мощности в импульсе на выходном торце ОВ как функцию времени распространения t и обозначается $g(t)$. Полагая для простоты, что полная мощность равна единице, получим

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} g(t) dt . \quad (4.24)$$

Для получения функции $g(t)$ необходимо иметь данные об источнике излучения и об особенностях распространения лучей по ОВ. Мощность излучения рассматривается распределенной по различным лучевым направлениям. Поскольку мощность излучения по отдельному лучу не определена, то вместо луча используется понятие лучевой трубки (подобно понятию трубки потока мощности в теории электромагнитного поля), т.е. трубки с бесконечно малым поперечным сечением, в пределах которой все лучи имеют одинаковое направление. По направлениям лучей от элементарного элемента поверхности излучения различают диффузный (ламбертов) и коллиминированный источники. Диффузный источник испускает лучи по всем направлениям, а коллиминированный – только по одному.

Диффузионным источником хорошо моделируется светодиод, коллимированным – лазер. Почти для всех профилей ОВ, имеющих практическое применение, импульсный отклик представляет собой очень сложную функцию. Так, например, для простейшего ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления и диффузного источника с учетом только межмодовой дисперсии

$$g(t) = \frac{2n_1^4}{n_1^2 - n_2^2} \frac{L^2}{c^2 t^3}, \quad (4.25)$$

т. е. функция $g(t)$ обратно пропорциональна третьей степени времени распространения импульса в ОВ. При учете дисперсии материала и наличии более сложных профилей ОВ возможность получить зависимость $g(t)$ аналитическим путем практически исключается. Поэтому обычно она определяется численно для различных промежутков времени t .

Для получения информации о распределении мощности в выходном импульсе используют также и моменты импульсного отклика

$$R_i = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t^i g(t) dt, \quad \text{где } i = 1, 2, 3. \quad (4.26)$$

Первый момент численно равен усредненному с весовой функцией распределения мощности в импульсе групповому времени распространения. Средняя квадратическая ширина распределения мощности в выходном импульсе определяется через первый и второй моменты:

$$\sigma = \sqrt{R_2^2 - R_1^2}. \quad (4.27)$$

4.2 Затухание оптических сигналов

Оптические волокна используются для передачи сигналов на относительно большие расстояния, поэтому потери энергии (затухание, ослабление) света в них должны быть незначительны. Во всяком случае значительно ниже ослабления света в обычных прозрачных материалах.

В проводимом ранее анализе распространения света в ОВ не учитывались потери мощности. На самом деле ОВ не являются идеаль-

ными и оптический сигнал в них частично (а в линиях большой длины почти полностью) поглощается в материале сердечника и рассеивается на неровностях поверхности раздела сердечника и отражающей оболочки ОВ. Оптические потери мощности оцениваются коэффициентом затухания оптического сигнала, измеряемым в децибелах на километр (дБ/км). Он характеризует ослабление мощности оптического сигнала при распространении по ОВ при установившемся режиме.

Затухание ОВ в общем случае определяется многими факторами:

- фундаментальными механизмами собственного ослабления (поглощения) света в исходных материалах, в ультрафиолетовой и инфракрасной частях света, а также релеевского рассеяния;

- примесными и микроструктурными дефектами в исходных материалах (ионы металлов – железа, меди, никеля и др., гидроксильные ионы ОН, металлические и неметаллические включения, легирующие добавки);

- технологией изготовления ОВ и кабелей (микротрещины, микроизгибы, закрутка, деформации ОВ, защитное покрытие и др.);

- воздействием окружающей среды, условиями монтажа и эксплуатации оптических кабелей.

Дополнительное затухание вносит рассеяние, обусловленное непостоянством показателя преломления вдоль волокна, отклонениями формы поперечного сечения.

Полные оптические потери определяются потерями от ввода (торца) $\alpha_{\text{т}}$ и линейными $\alpha_{\text{л}}$ потерями:

$$\alpha = \alpha_{\text{т}} + \alpha_{\text{л}}. \quad (4.28)$$

Потери при вводе оптического сигнала от источника излучения в ОВ возникают из-за несовпадения апертур излучателя и световода и из-за отражения лучей от торца сердечника ОВ. В современных системах волоконно-оптической передачи благодаря применению излучателей с оптимальной диаграммой направленности и правильно-му их согласованию с ОВ торцевые потери не превышают 4 % мощности источника и их можно не учитывать.

Линейные потери по своей физической природе делятся на потери из-за рэлеевского рассеяния и на потери из-за поглощения (абсорбционные потери):

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{п}}. \quad (4.29)$$

Рэлеевское рассеяние свойственно всем прозрачным средам. Оно обусловлено флуктуационными изменениями плотности материала. Причинами флуктуаций плотности кварцевого стекла являются броуновские движения молекул во время застывания стеклянной массы при изготовлении ОВ. В кварцевом стекле, содержащем несколько окислов, возможны не только флуктуации плотности, но и флуктуации состава. Так как линейные размеры флуктуаций много меньше длины волны распространяемого по кабелю света, они действуют как точечные источники рассеянного излучения. Оптические потери из-за рассеяния точечными источниками со случайными координатами описываются сложными выражениями, характерной особенностью которых является резкая зависимость затухания оптического сигнала от длины волны света ($\alpha_0 \approx \lambda^{-4}$).

Механизм поглощения света в материалах имеет пять разновидностей: собственное поглощение, примесное поглощение, экситонное поглощение, решеточное поглощение и поглощение на свободных носителях. Абсорбционные потери в ОВ из кварцевого стекла практически полностью обусловлены собственным поглощением в инфракрасной области спектра и примесным поглощением присутствующими в материале ОВ ионами металлов и ионами гидроксильной группы OH^- . Ионы металлов создают равномерное и незначительное поглощение по всему видимому спектру, а ионы OH^- создают поглощение с острыми пиками на длинах волн 0,72, 0,88, 0,94, 1,24 и 2,72 мкм и главным образом определяют так называемые "окна прозрачности" ОВ, где затухание относительно мало. Примерная спектральная характеристика затухания ОВ из кварцевого стекла, легированного германием, приведена на рисунке 4.2.

Рассмотренные оптические потери зависят от материала, из которого изготовлено ОВ. Они определяют теоретический минимальный предел, до которого можно снизить линейные затухания. Реальные затухания выше, так как имеются дополнительные потери, связанные с технологией изготовления и прокладки кабелей, из-за микронеровностей поверхности сердечника и изгибов ОВ.

На рисунке 4.3 показана зависимость затухания от длины волны света для ОВ из кварцевого стекла, очищенного от посторонних примесей. Видно, что у кварцевого стекла существуют диапазоны длин волн, для которых затухание света минимально. Такие диапазоны называют окнами прозрачности.

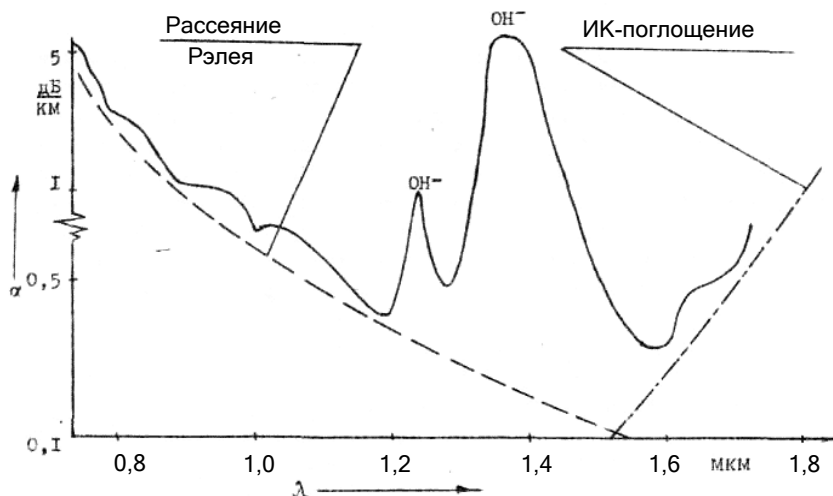


Рисунок 4.2 – Спектральная характеристика оптических потерь в оптическом волокне

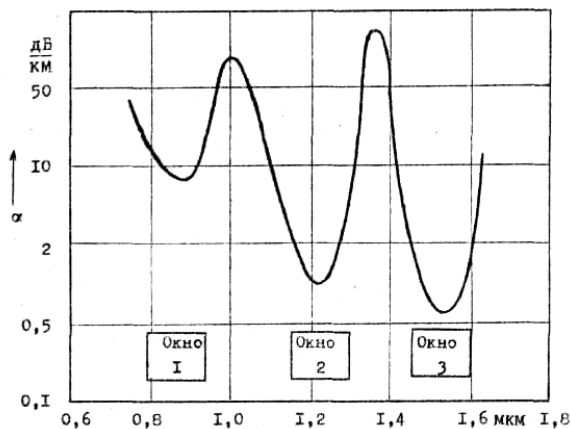


Рисунок 4.3 – Окна прозрачности оптического волокна

Первое окно прозрачности находится в диапазоне длин волн 0,80–0,95 мкм, второе – 1,15–1,30 и третье – в диапазоне 1,45–1,60. Поэтому в ВОСП целесообразно использовать диапазоны этих длин волн.

За последние годы достигнуты значительные успехи в технологии изготовления оптического волокна. Результирующее затухание в нем определяется в основном рэлеевским рассеянием на неоднородно-

стях в решетке стекла и собственным поглощением в инфракрасной области, обусловленным колебательными полосами поглощения в компонентах, входящих в состав стекла. Поэтому рабочий диапазон длин волн для кварцевых ОВ составляет 0,7–1,6 мкм. В этом диапазоне волн в одномодовых и лучших многомодовых ОВ затухание на волне 0,85 мкм уменьшается от 2–3 до 0,5–0,8 дБ/км, а на волне 1,3 и 1,5 мкм – до 0,2–0,4 дБ/км.

Перспективным является диапазон более длинных волн (инфракрасных). Так как рэлеевское рассеяние убывает пропорционально λ^{-4} , то можно ожидать значительное снижение затухания при увеличении длины волны. Например, на волне 4–5 мкм затухание 0,01 дБ/км и на волне 10,6 мкм – 0,001 дБ/км. На таких волокнах можно достичь значительного увеличения протяженности ВОЛС без использования регенераторов (усилителей).

В таблице 4.1 приведены параметры некоторых зарубежных многомодовых ОВ. В диапазоне волн 1,30–1,55 мкм ОВ имеют затухание 0,7–1,5 дБ/км и широкополосность 0,6–1,2 ГГц/км, что соответствует рекомендации G.651 МСЭ.

Таблица 4.1 – Параметры многомодовых оптических волокон

| Страна изготовитель | Длина волны, мкм | Затухание, дБ/км | Полоса пропускания, МГц/км | Строительная длина, км |
|---------------------|------------------|------------------|----------------------------|------------------------|
| Франция | 1,3 | 1,0 | 1000 | 2,2 |
| США | 1,3 | 0,7 | 1200 | - |
| США | 1,55 | 0,6 | 1200 | - |
| Франция | 1,3 | 0,7 | 1000 | - |
| США | 1,3 | 0,75 | 800 | - |
| Нидерланды | 1,3 | 0,7 | 1200 | 1,1 |
| Япония | 1,3 | 0,7 | 1000 | - |

4.3 Дисперсия оптических сигналов

В процессе распространения импульсов света по ОВ происходит уширение импульсов. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.

Дисперсия – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины L по формуле $\tau(L) = \sqrt{t_{in}^2 - t_{out}^2}$. Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/км.

Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами, рассматриваемыми ниже:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовой дисперсией τ_{md});
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией τ_w);
- свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией τ_{mat}).

Чем меньше значение дисперсии, с тем большей скоростью можно передать по ОВ поток информации. Результирующая дисперсия τ определяется из формулы

$$\tau^2 = \tau_{md}^2 + \tau_{chr}^2 = \tau_{md}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2. \quad (4.30)$$

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения у мод и имеет место только в многомодовом волокне.

Неоднородности, которые есть в реальном волокне, приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. Если длина кабеля больше длины межмодовой связи, то наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2 км и значительно меньше длины межмодовой связи.

Значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином полоса пропускания. Измеряется полоса пропускания в МГц·км. Дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл полосы пропускания – это максимальная частота (частота модуляции) передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одно-

модовом, так и в многомодовом ОВ. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом ОВ из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны.

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны. Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация материальной и волновой дисперсий, а результирующая дисперсия обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии (λ_0). Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.

Хроматическая дисперсия измеряется в пикосекундах на нанометр-километр (пс/(нм·км)). Это уширение в пс, происходящее в импульсе шириной 1 нм при прохождении по ОВ длиной 1 км.

Хроматическая дисперсия линии передачи накапливается с ростом пройденного расстояния, это характеризуется изменением групповой задержки, отнесенной к единичной длине волны (пс/нм).

Явление хроматической дисперсии ослабевает по мере уменьшения спектральной ширины излучения лазера. Увеличение влияния хроматической дисперсии наблюдается при увеличении скорости передачи, т. е. увеличивается скорость модуляции лазеров, в результате чего увеличивается ширина боковых полос.

Хроматическая дисперсия системы передачи чувствительна:

- к увеличению длины и числа участков линии связи;
- увеличению скорости передачи (т. е. увеличивается эффективная ширина линии генерации источника).

На нее в меньшей степени влияют:

- уменьшение частотного интервала между каналами;
- увеличение числа каналов.

Хроматическая дисперсия уменьшается:

- при уменьшении абсолютного значения хроматической дисперсии ОВ;

– компенсации дисперсии.

Поляризационная модовая дисперсия τ_{pmd} возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды. Коэффициент удельной дисперсии T нормируется в расчете на 1 км и имеет размерность пс/ $\sqrt{\text{км}}$, а τ_{pmd} растет с ростом расстояния по закону $\tau_{pmd} = T\sqrt{L}$. Для учета вклада в результирующую дисперсию следует добавить слагаемое τ_{pmd}^2 в формулу (4.30). Из-за небольшой величины τ_{pmd} может проявляться исключительно в одномодовом волокне, причем когда используется передача широкополосного сигнала (полоса пропускания 2,4 Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной полосой излучения 0,1 нм и меньше. В этом случае хроматическая дисперсия становится сравнимой с поляризационной модовой дисперсией. В одномодовом ОВ в действительности может распространяться не одна мода, а две фундаментальные моды – две перпендикулярные поляризации исходного сигнала. В идеальном волокне, в котором отсутствуют неоднородности по геометрии, две моды распространялись бы с одной и той же скоростью (рисунок 4.4, а). Однако на практике волокна имеют не идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных составляющих мод (рисунок 4.4, б).

Избыточный уровень τ_{pmd} , проявляясь вместе с chirпированным модулированным сигналом от лазера, а также поляризационной зависимостью потерь, может приводить к временным колебаниям амплитуды аналогового видеосигнала. В результате ухудшается качество изображения, или появляются диагональные полосы на телевизионном экране. При передаче цифрового сигнала высокой полосы (>2,4 Гбит/с) из-за наличия τ_{pmd} может возрастать битовая скорость появления ошибок.

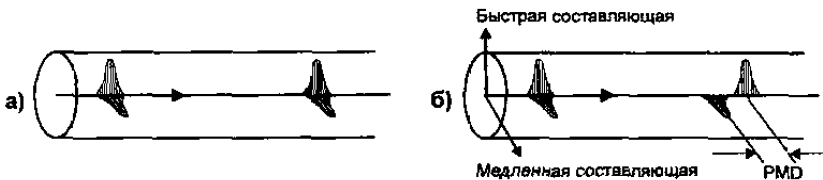


Рисунок 4.4 – Распространение взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды

Главной причиной возникновения поляризационной модовой дисперсии является нециркулярность (овальность) профиля сердцевины одномодового ОВ, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. При изготовлении волокна только строгий контроль позволяет достичь низких значений этого параметра.

Контрольные вопросы

- 1 Оптический закон Снелля.
- 2 Факторы, определяющие затухание сигнала в оптическом волокне.
- 3 Время прохождения луча по оптическому волокну.
- 4 Окна прозрачности оптического волокна.

5 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

5.1 Основные конструкции и элементы оптических кабелей

Оптические волокна, заключенные в общую оболочку, вместе с защитным покрытием и броней образуют волоконно-оптический кабель.

Волоконно-оптические кабели практически полностью вытеснили все другие направляющие структуры на магистральных и дорожных линиях первичных цифровых сетей связи железнодорожного транспорта. Это связано со многими достоинствами ВОК: относительно высокая защищенность от несанкционированного перехвата передаваемой информации, пожаробезопасность, относительно невысокая стоимость по сравнению с кабелем с медными жилами и практически неограниченные запасы сырья для производства волокна.

Геометрические размеры и параметры передачи ОВ применяемых ВОК должны соответствовать одной из следующих рекомендаций МСЭ-Т:

- G 651. Характеристики многомодового градиентного волоконно-оптического кабеля 50/125 мкм;
- G 652. Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля;
- G 653. Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля со сдвигом дисперсии;
- G 654. Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с затуханием, минимизированным на волне 1,55 мкм;
- G 655. Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с нулевой дисперсией.

Основные параметры ОВ приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры рекомендованных МСЭ-Т оптических волокон

| Страна изготовитель | Длина волны, мкм | Затухание, дБ/км | Полоса пропускания или дисперсия | Строительная длина, км |
|---------------------|------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|
| Франция | 1,3 | 0,8 | 25 ГГц·км | 5–10 |
| США | 1,3–1,55 | 0,5–0,8 | 1,5 пс/нм·км | 2,2 |
| США | 1,3 | 0,6 | 5 ГГц·км | 10 |
| Япония | 1,3 | 0,5 | – | – |
| Япония | 1,3 | 0,7 | – | – |
| США | 1,31 | 0,45 | – | 2,2 |
| США | 1,3 | 0,5–0,7 | 3,5 пс/нм·км | – |
| США | 1,3 | 0,44 | 1,0 пс/нм·км | – |

5.2 Классификация волоконно-оптических кабелей

ВОК в зависимости от назначения существенно различаются по конструкции. По размещению в них конструктивных элементов их можно разделить на четыре основных типа: многоповивные кабели или кабели повивной скрутки; кабели пучковой скрутки; кабели с профильными сердечниками; ленточные кабели (рисунок 5.1). Однако неизменными элементами любого из них являются ОВ, силовой элемент (один или несколько) и наружная оболочка, обеспечивающая механическую и климатическую защиту.

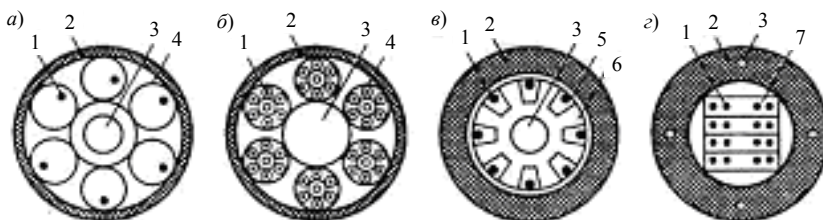


Рисунок 5.1 – Типы оптических кабелей: а – повивной скрутки; б, в – профильным сердечником; г – ленточной скрутки; 1 – оптическое волокно; 2 – оболочка кабеля; 3 – упрочняющий элемент; 4 – трубка оптического модуля; 5 – скрепляющая лента; 6 – профильный сердечник; 7 – лента с несколькими оптическими волокнами

В кабеле с повивной скруткой (рисунок 5.1, а) вокруг центрального силового элемента наматываются в виде повива отдельные оптические модули со свободно уложенными ОВ с защитным покрытием. Обычно ВОК этого типа содержит небольшое количество модулей (6–8) и его внешний диаметр – 10–12 мм.

Оптический кабель пучковой скрутки (рисунок 5.1, б) состоит из пучков оптических модулей, повитых вокруг центрального силового элемента. Пучок представляет трубку из полимера со свободно уложенными в ней ОВ. Кабель пучковой скрутки содержит обычно 20–50 модулей и его внешний диаметр – 10–20 мм.

Основу ВОК с профильным сердечником (рисунок 5.1, в) составляет пластиковый элемент с винтообразными пазами, в которые свободно, без натяжения уложены волокна с защитной оболочкой или модули, диаметр которых меньше ширины паза. В кабеле обычно находится 8–10 волокон. Его внешний диаметр – около 20 мм.

Ленточная скрутка (рисунок 5.1, з) и скрутка допускает большую плотность укладки волокон в кабеле.

Особую группу составляют самонесущие подвесные ВОК, которые подвешивают на опорах различного типа. На практике широкое применение находят и другие конструкции кабелей, например, самонесущие ВОК (рисунок 5.2), предназначенные для подвески на опорах высоковольтных линий электропередач и автоблокировки, а также контактной сети электрифицированных железных дорог.

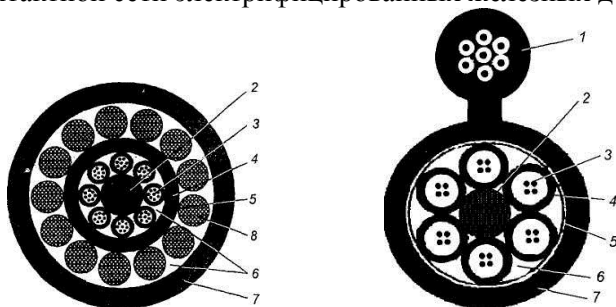


Рисунок 5.2 – Виды самонесущих оптических кабелей в разрезе: 1 – несущий трос; 2 – центральный силовой элемент; 3 – ОВ; 4 – оптический модуль; 5 – защитная оболочка; 6 – гидрофобный компаунд; 7 – наружная защитная оболочка; 8 – армирующие элементы

Кроме центрального силового элемента кабеля содержат либо внешний силовой элемент (несущий трос), либо армирующие элементы (стержни, нити), равномерно распределенные по периферии поперечного сечения между сердечником и оболочкой. Центральный силовой элемент и трос обычно изготавливают из стеклопластикового стержня, стальной проволоки или пучка нитей высокопрочной пластмассы (кевлар, терлон, тварон).

Кроме ВОК цилиндрической формы в некоторых случаях находят применение ленточные кабели, в которых ОВ укладываются свободно в отверстиях внешней оболочки, чтобы уменьшить деформацию при изгибах кабеля.

Особую группу составляют электрические силовые кабели, в состав которых, кроме трех-четырех жил для электропередачи, входят также модули оптических волокон. Мощное электромагнитное поле силовых жил не влияет на оптические сигналы, распространяющиеся по волокну, т. е. в силовых кабелях обеспечивается электромагнитная совместимость электрических и оптических сигналов.

На практике находят применение и другие конструкции ВОК, которые кроме ОВ и упрочняющих элементов могут содержать изолированные металлические (медные) жилы для организации дистанционного электропитания необслуживаемых усилительных (регенерационных) пунктов, находящихся в линейном тракте ВОЛП, а также для организации служебной связи технического персонала.

Таким образом, ВОК представляет собой сложную многокомпонентную конструкцию, содержащую ОВ, и 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).

5.3 Диэлектрические кабели связи для железных дорог

ВОК, используемые на участках магистральной сети железнодорожного транспорта, должны иметь не менее 16 волокон, на участках для подключения удаленных от магистрали объектов – не менее 8 волокон (с учетом обеспечения резервирования и защиты). На всех промежуточных станциях для организации связи технологического сегмента должно быть выделено не менее 4 темных волокон.

Для производства ВОК в конце 1996 года в России было создано ЗАО «ТрансВОК», которое в настоящее время является одним из крупнейших предприятий по выпуску различных конструкций кабелей для железных дорог стран СНГ и других ведомств.

ЗАО «ТрансВок» выпускает следующие типы волоконно-оптических кабелей по ТУ 3687-002-45869304-98: ОКМС – оптический кабель магистральный самонесущий (рисунок 5.3) диэлектрический (без метал-

лических элементов в их конструкции) для прокладки на опорах контактной сети и высоковольтных линиях автоблокировки железных дорог; ОКМТ – магистральный диэлектрический для прокладки в трубопроводах «*Duraline*»; ОКЗ – внутризональный с металлической ленточной броней для прокладки в городской телефонной канализации, блоках, коллекторах, трубах, шахтах и др.

Все волоконно-оптические кабели производства ЗАО «Транс-ВОК» соответствуют требованиям международного стандарта ISO-9002. Технические характеристики ВОК для стандартного одномодового оптического волокна (ITU-T G.652) приведены в таблице 5.2.

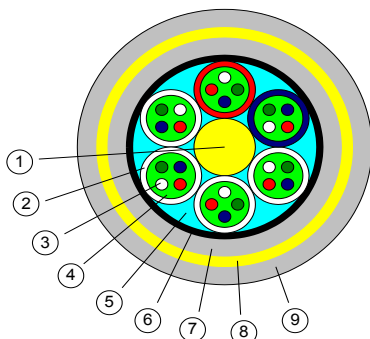


Рисунок 5.3 – Оптический кабель марки ОКМС-А-6 (2,4) Сп-24 (2):

1 – центральный силовой элемент (стеклопластик); 2 – оптический модуль из полибутилтерефталата (ПБТ); 3 – стандартное одномодовое окрашенное оптическое волокно; 4 – внутримодульный гидрофобный наполнитель; 5 – межмодульный гидрофобный наполнитель; 6 – бандажная лента и нити; 7 – внутренняя оболочка (полиэтилен ПА-12); 8 – упрочняющие нити (арамид); 9 – внешняя оболочка

Применение для железных дорог ВОК большой емкости (48 или 96 волокон – как это принято во многих экономически развитых странах) не обосновано. С точки зрения темпов развития рынка и наличия уже сегодня существующих и строящихся сетей связи в ближайшие 10–12 лет будет невозможно создать трафик для кабеля такой ёмкости. Нарращивание емкости необходимо планировать на будущее не за счет увеличения количества ОВ, а за счет применения технологий спектрального уплотнения (с разделением каналов по длине волны). Поэтому для создания ДЦСС применяется 16-волоконный ВОК, который содержит 12 оптических волокон *SP* (стандартное ступенчатое одномодовое волокно) и 4 волокна *NZDSF* (одномодовое волокно со смещенной ненулевой дисперсией).

Таблица 5.2 – Оптические и технические характеристики ВОК

| Характеристика | Значение |
|--|--|
| Число оптических волокон в кабеле, шт. | От 6 до 64 |
| Коэффициент затухания, дБ/км (не более): $\lambda = 1310$ нм $\lambda = 1550$ нм | 0,35 0,22 |
| Длина волны отсечки в кабеле, нм | 1150–1270 |
| Диаметр модового поля, мкм: $\lambda = 1310$ нм $\lambda = 1550$ нм | 9,3±0,5 10,5±1,0 |
| Тип одномодовых оптических волокон, рекомендации ИТУТ | G.652 G.653 G.655 |
| Температура эксплуатации, °С: ОКМС ОКМТ ОКЗ | От –60 до +70 “ –40 “ +60 “ –60 “ +60 |
| Номинальный наружный диаметр оптических модулей, мм | 2,0; 2,4; 3,0 |
| Число оптических модулей в кабеле, шт. | 6; 8 |
| Строительная длина кабеля, км (не менее): ОКМС, ОКМТ ОКЗ | 4,0 2,0 |
| Номинальный наружный диаметр кабеля, мм: ОКМС, ОКМТ ОКЗ | От 12,5 до 17,0 “ 14,9 “ 19,8 |
| Длительное допустимое растягивающее усилие, кН: ОКМС ОКМТ ОКЗ | От 3,0 до 10,0 “ 1,5 “ 2,5 “ 1,5 “ 4,0 |
| Минимальная температура монтажа кабеля, °С | –10 |
| Срок службы, лет (не менее) | 25 |

5.4 Комбинированные кабели для железных дорог

При строительстве и реконструкции устройств автоматики, телемеханики и связи на малодейственных участках железных дорог с тепловозной тягой и электрической тягой применяется комбинированный кабель с ОВ и медными жилами.

Комбинированные кабели предназначены для организации ВОЛП в цифровых и аналоговых системах передачи в диапазоне частот до 400 кГц по парам высокочастотных электрических четверок с мед-

ными жилами, в электрических установках устройств СЦБ при номинальном напряжении 380 В переменного тока частотой 50 Гц и 700 В постоянного тока по вспомогательным парам, в том числе скрученным в четверки.

Конструкция кабелей марки МКПВБАШп (ЭпП) $2 \times 4 \times 1,05+9 \times 2 \times 0,7/ОКЗ 2 \times 4-0,36/0,22$ показана на рисунке 5.4.

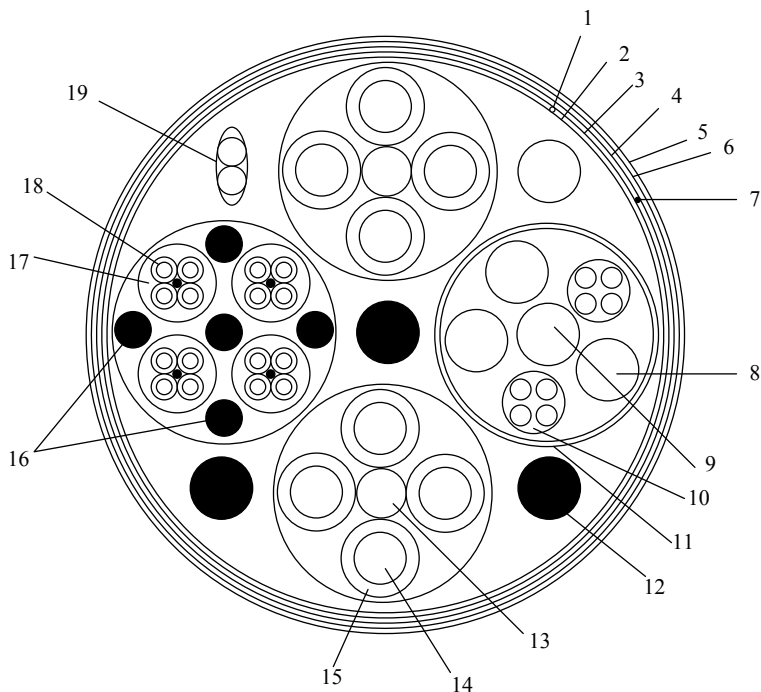


Рисунок 5.4 – Конструкция комбинированного кабеля: 1 – контрольная жила; 2 – лента из водоблокирующего материала; 3 – поясная изоляция; 4 – экран из алюмополиэтиленовой ленты и контактной проволоки (или алюминиевая оболочка); 5 – оболочка из полиэтилена; 6 – алюмополиэтиленовая лента (алюминиевая оболочка); 7 – контактная проволока; 8 – модули-заполнители из полиэтилена; 9 – центральный силовой элемент из стеклопластика; 10 – оптические модули; 11 – оболочка из полиэтилена; 12, 13, 16 – кордели из водоблокирующего материала; 14 – изолированные жилы высокочастотных четверок; 15 – высокочастотная четверка; 17 – звездная четверка вспомогательных жил; 18 – изолированная жила вспомогательных пар (четверок); 19 – вспомогательная пара, скрученная из двух изолированных жил

Количество оптических модулей – 2. Оптический элемент представляет собой сердечник, скрученный из оптических модулей разного цвета и корделей – наполнителей из полиэтилена вокруг силового элемента из стеклопластика, в общей оболочке из полиэтилена.

Оптические волокна одномодовые стандартные в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.652. По согласованию с заказчиком допускается применение в конструкции кабеля дополнительно до 12 стандартных одномодовых ОВ, расположенных равномерно в дополнительных оптических модулях, введенных вместо корделей-наполнителей.

Высокочастотные четверки скручены из четырех изолированных жил. Количество высокочастотных четверок – 1, 2 или 3.

Оптические волокна имеют следующие параметры:

- коэффициент затухания не более 0,36 дБ/км на длине волны 1310 нм и не более 0,22 дБ/км на длине волны 1550 нм;
- хроматическая дисперсия не более 3,5 пс/нм·км в диапазоне волн 1285–1330 нм и не более 18 пс/нм·км в диапазоне длин волн 1525–1575 нм;
- числовая апертура оптических волокон 0,13 на длине волны: 1310 нм;
- коэффициент затухания пар высокочастотных четверок на частоте 150 кГц – не более 2,1 дБ/км, вспомогательных пар (четверок) на частоте 0,8 кГц – не более 1,2 дБ/км.

5.5 Трасса волоконно-оптической линии связи

Трасса ВОЛС определяется трассой железнодорожного участка. Пример участка железной дороги и взаимосвязанной с ним трассой ВОЛС изображен на рисунке 5.5. ВОК проходит вдоль железной дороги с переходами через автомобильные дороги и реки, вводами кабеля в производственные здания.

Трасса ВОЛС зависит, в основном, от принятого при строительстве способа прокладки ВОК (подземный или воздушный). Конкретный выбор способа прокладки ВОК зависит от многих факторов. Общие сведения о прокладке кабелей связи приведены в Рекомендациях МСЭ-Т «Технология линейно-кабельных сооружений для сетей общего пользования». В них содержатся указания особо важного

значения, относящиеся исключительно к ВОК. Конкретный выбор способа прокладки ВОК зависит от многих факторов.

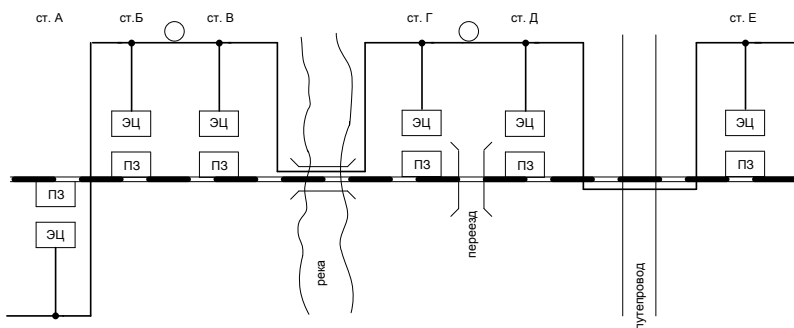


Рисунок 5.5 – Трасса волоконно-оптического кабеля связи участка железной дороги: ПЗ – производственное здание; ЭЦ – электрическая централизация

Выбор между воздушной и подземной прокладками зависит от рельефа местности, категории грунта и др. При прокладке в земле трасса может находиться как в полосе отвода железной дороги, так и в пределах земного полотна.

На железнодорожном транспорте при строительстве ВОЛС наибольшее распространение нашли способы прокладки ВОК на опорах контактной сети (КС) электрифицированных железных дорог и высоковольтных линиях автоблокировки (АБ), а также в трубопроводах. За счет воздушной подвески ВОК капитальные затраты снижаются до 30 % относительно его подземной прокладки. Одновременно обеспечиваются практически идеальные условия для осмотра линейно-кабельных сооружений (ЛКС) при планировании регламентных и профилактических работ в процессе технической эксплуатации ВОЛП, создаются благоприятные возможности для своевременного подъезда эксплуатационного персонала к месту производства работ, в том числе и аварийно-восстановительных.

В то же время ВОК, подвешенный на опорах КС и АБ, в отличие от его подземной прокладки, в большей степени подвержен воздействию внешних и внутренних факторов, отрицательно влияющих на устойчивое функционирование ВОЛП. Поэтому, при планировании и создании цифровых сетей связи железнодорожного транспорта необходимо учитывать последствия влияний на ВОЛП внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, а также оценивать меры, ко-

торые предпринимается эксплуатационными подразделениями для обеспечения надежной и устойчивой работы сети связи в реальных условиях окружающей среды и принятой системы технической эксплуатации (СТЭ).

К специфическим внешним воздействующим факторам, влияющим на работоспособность ВОЛП, в случае подвески ВОК на опорах КС и АБ, могут быть отнесены колебания и вибрации, вызванные природными явлениями и движущимся транспортом, повреждения кабеля в результате падения опор, злоумышленных действий населения, электрических разрядов молнии, проведения несанкционированных строительных работ в зоне прохождения кабеля и других причин, связанных с нарушением правил охраны линий связи.

Контрольные вопросы

- 1 Конструкция волоконно-оптических кабелей, их особенности.
- 2 Классификация волоконно-оптических кабелей.
- 3 Самонесущие волоконно-оптические кабели, их особенности.
- 4 Диэлектрические волоконно-оптические кабели.
- 5 Волоконно-оптические кабели связи для железных дорог.
- 6 Оптико-механические параметры волоконно-оптических кабелей.

6 МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

6.1 Общие сведения

Функциональная схема многоканальной ВОЛП приведена на рисунке 6.1. Она содержит, как правило, следующие основные сооружения: узлы связи, которые в большинстве случаев выполняют функции оконечных пунктов, а также транзитных пунктов – обслуживаемых усилительных пунктов (ОУП). Между ними размещаются необслуживаемые усилительные пункты (НУП), регенерационные (НРП) пункты, дистанционно питаемые из оконечных пунктов, либо имеющие автономные источники электропитания и энергоснабжения.

Состав оконечных пунктов на ВОЛП определяется схемой организации связи. Оконечный пункт – комплекс, состоящий из аппаратуры систем передачи, оборудования электропитания и энергоснабжения, средств технической эксплуатации.

Линейно-кабельные сооружения включают: кабели, соединительные, разветвительные и др., муфты, вводные оконечные кабельные устройства, оборудование для постановки и содержания кабелей под постоянным избыточным давлением, устройства защиты кабеля от коррозии, ударов молнии и от источников внешнего электромагнитного влияния, а также НУП (НРП) и их наземные сооружения, защитные заземления, кабельную канализацию и др.

Станционные сооружения представляют собой комплекс систем передачи, обеспечивающий образование типовых групповых трактов и каналов первичной сети связи.

Электроустановки оборудуются в оконечных и промежуточных пунктах и обеспечивают системы передачи, автоматики и телемеханики, освещения и другие устройства связи как в нормальных, так и аварийных условиях. В состав электроустановок входят: ЛЭП, трансформаторные подстанции, собственные или мобильные дизельные электрические генераторы и электрические питающие установки (ЭПУ); в состав ЭПУ – выпрямительные устройства, аккумуляторные батареи, преобразователи и стабилизаторы напряжения, необходимые для электропитания аппаратуры связи и др.

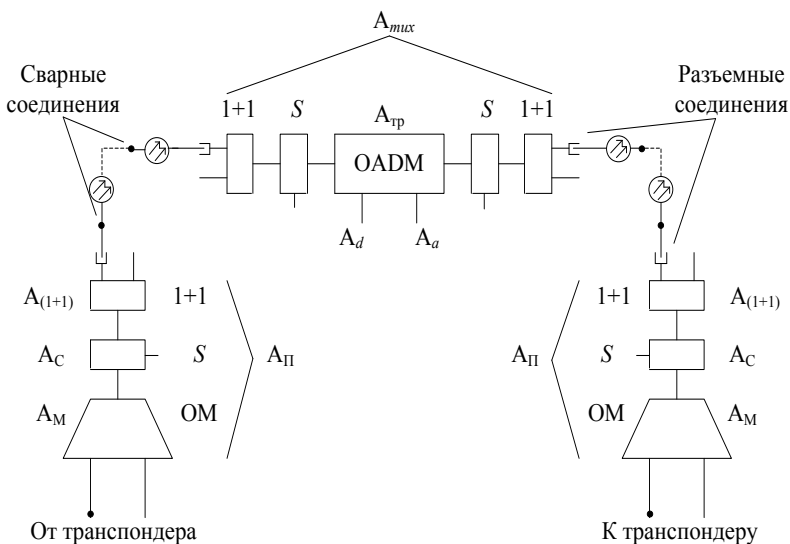


Рисунок 6.1 – Волоконно-оптическая система передачи

В настоящее время в ВОЛП применяются ЦСП с временного мультиплексирования на основе технологии SDH/СЦИ, а также технологии мультиплексирования по длине волны WDM. Системы WDM позволяют получить более высокую пропускную способность линии передачи без прокладки дополнительного ВОК.

В передатчике ВОЛП (см. рисунок 6.1) электрические сигналы N первичных цифровых каналов (основных цифровых каналов ОЦК) со скоростью передачи 64 кбит/с преобразуются в оптический сигнал и передаются по ОВ линейного тракта. В приемнике осуществляется обратное преобразование принимаемого оптического сигнала в N первичных цифровых электрических сигналов. 30 каналов ОЦК (каналов нулевого уровня) формируют первичный цифровой информационный поток со скоростью передачи $64 \cdot 30 = 1920$ кбит/с. Для осуществления синхронизации, сигнализации и контроля ошибок к нему добавляются еще два канала ОЦК, в результате этого первичный цифровой канал (ПЦК) имеет скорость передачи 2048 кбит/с = $2,048$ Мбит/с. Далее путем каскадного мультиплексирования (мультиплексор типа 4:1), можно сформировать цифровые каналы 2–5-го уровней иерархии со скоростями передачи 8,448; 34,368; 139,264; 564,992 Мбит/с (или приблизительно 8; 34; 140; 565 Мбит/с). Указанная иерархия позволяет организовать соответственно 30, 120, 480, 1920 и 7680 каналов ОЦК. По рекомендации МСЭ-Т она получила обозначение E1–E5.

В системе SDH/СЦИ возможно выделение (или ввод) из цифрового потока высокого уровня цифровых потоков более низкого уровня (вплоть до ПЦК) без демультимплексирования и последующего мультиплексирования последних. Кроме того, наличие жесткой синхронизации на всех уровнях позволяет осуществлять оперативное управление информационными потоками в сети из одного центра вплоть до изменения конфигурации сети.

Аппаратура SDH/СЦИ всех уровней предназначена для работы по одномодовым волокнам типа SF, DSF, NZDSF во 2-м и 3-м окнах прозрачности.

6.2 Технологии передачи цифровых сигналов

Для построения современных цифровых сетей связи наибольшее применение находят сетевые технологии плезиохронной цифровой иерархии PDH/ПЦИ (Plesiochronous Digital Hierarchy), SDH/СЦИ и

асинхронного режима передачи АТМ (Asynchronous Transfer Mode). В последние годы получили развитие также технологии плотного волнового мультиплексирования DWDM (Dense Wave length Division Multiplexing), IP (Internet Protocol) поверх АТМ и IP поверх SDH/СЦИ.

Технологии PDH/ПЦИ, SDH/СЦИ и АТМ широко применяются для построения сетей связи разного масштаба. Технология АТМ в отличие от PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ охватывает не только уровень первичной (транспортной) сети, но и объединяет уровни вторичных сетей и сетей доступа с первичной сетью.

В транспортных сетях используется иерархия скоростей передачи в соответствии с международными рекомендациями МСЭ-Т и получившим наибольшее распространение европейским стандартом, который применяют на сетях связи стран СНГ.

6.2.1 Плездохронная цифровая иерархия

Плездохронная цифровая иерархия включает в себя несколько уровней с разными скоростями.

Технология PDH/ПЦИ поддерживает следующие уровни иерархии цифровых каналов: абонентский или основной канал E0 и пользовательские каналы уровней E1–E4. Уровень цифрового канала E5 определен в рекомендациях МСЭ-Т, но на практике его обычно не используют.

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 сетях в виде виртуальных контейнеров соответствующего уровня.

Цифровая первичная (транспортная) сеть, как правило, строится на основе совокупности аппаратуры PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ. Цифровые каналы транспортной сети с пропускной способностью (скоростью передачи) от 64 кбит/с до 140 Мбит/с создаются на основе технологии PDH/ПЦИ, а каналы со скоростью передачи 155 Мбит/с и более создаются на основе технологии SDH/СЦИ (таблицы 6.1 и 6.2).

Таблица 6.1 – Общие характеристики и скорости передачи PDH/ПЦИ

| Уровень PDH/ПЦИ | Номинальная скорость передачи, кбит/с | Пределы отклонения скорости передачи, кбит/с · 10 ⁻⁵ |
|-----------------|---------------------------------------|---|
| E0 | 64 | ±5 |
| E1 | 2048 | ±5 |
| E2 | 8448 | ±3 |
| E3 | 34368 | ±2 |
| E4 | 139264 | ±1,5 |

Технологии PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ взаимодействуют друг с другом через процедуры мультиплексирования и демультимплексирования цифровых потоков E1, E3 и E4 PDH/ПЦИ в аппаратуре SDH/СЦИ. Здесь и далее для соответствующей технологии PDH/ПЦИ или SDH/СЦИ ограничимся в основном европейским стандартом цифровых иерархий, который получил применение на железных дорогах России и других стран СНГ. В таблице 6.1 приведены общие характеристики ОЦК E0 и сетевых трактов E1–E4 PDH/ПЦИ.

Таблица 6.2 – 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 |

6.2.2 Синхронная цифровая иерархия

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.

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 (интерфейсы передачи, соответствующие синхронным транспортным модулям STM- N ($N = 1, 4, 16, 64, 256$)). 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. В таблице 6.2 приведены значения скоростей передачи синхронных транспортных модулей STM- N ($N = 1, 4, 16, \dots$) в технологии SDH/СЦИ.

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, ATM 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.

6.2.3 Асинхронный режим передачи

Технология ATM, 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 базовые значения скоростей передачи для интерфейсов доступа (пользовательских интерфейсов) соответствуют цифровым каналам E_0 , $n \times E_0$, E_1 , E_3 , E_4 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 ($N = 1, 4, 16, 64$ (см. таблицу 6.2)) SDH/СЦИ.

Технология АТМ опирается на принципы статистического мультиплексирования и подчиняется его законам. Разработчики технологии АТМ стремились к компромиссу между технологиями 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.

6.2.4 Технология IP

Технология IP является основой сети Интернет и представляет собой набор протоколов, называемый стеком протоколов TCP/IP, а протокол управления передачей IP-протоколом сети Интернет. Именно он реализует межсетевой обмен. Главным достоинством

является то, что стек протоколов TCP/IP обеспечивает надежную связь между сетевым оборудованием различных производителей. Протоколы стека TCP/IP описывают формат сообщений и указывают, каким образом следует обрабатывать ошибки, предоставляют механизм передачи сообщений в сети независимо от типа применяемого оборудования.

Стек протоколов TCP/IP предоставляет пользователям две основные службы, которые используют прикладные программы: дейтаграммное средство доставки пакетов в сети и надежную транспортную среду с логическими соединениями между сетевыми элементами.

Основные преимущества стека протоколов TCP/IP и технологии IP в целом, как сетевой технологии:

- независимость от вида и технологии сетевого оборудования;
- обеспечение всеобщей связанности элементов сети;
- обеспечение подтверждений правильности передачи сообщений;
- стандартные сетевые протоколы.

Стеку TCP/IP предстоит еще долгое время быть базовым в корпоративных и глобальных сетях. Это обусловлено практически полным отсутствием новых приложений, способных работать самостоятельно поверх сетей ATM.

Развитие телекоммуникационных технологий постоянно стимулируется поиском возможностей и технологий, способных наиболее эффективно объединять сети, превращая их в мультисервисные широкополосные и сверхширокополосные. В настоящее время наибольший прогресс достигнут в создании глобальных магистральных сетей на основе технологий IP поверх ATM и IP поверх SDH/СЦИ. В последние годы появились новые технологии передачи IP-трафика, предусматривающие унифицированные соединения маршрутизаторов через системы и среды, такие как WDM, DWDM, SDH/СЦИ, “темное волокно”. Примером такой технологии может быть предложенный в 1999 г. компанией Cisco Systems протокол SRP (Spatial Reuse Protocol), который впоследствии стал называться DPT (Dynamic Packet Transport). В технологии DPT воплотились лучшие качества таких технологий, как SDH/СЦИ, FDDI и др. Технология DPT (которую иногда называют “IP по волокну”) позволяет избежать

промежуточных протоколов других сетевых технологий, например SDH/СЦИ и АТМ, при передаче трафика IP по волокну.

К основным преимуществам технологии DPT можно отнести следующие. Применение формата SDH/СЦИ (уровня STM-1) позволяет передавать трафик DPT по сетям SDH/СЦИ благодаря чему обеспечивается их совместимость. При этом магистральные тракты занимают полосу пропускания лишь между точками передачи и приема сигналов, что позволяет более эффективно использовать пропускную способность кольцевой топологии сети DPT. Технологии DPT присущи развитые возможности резервирования трафика за счет реализации механизмов восстановления в кольцевой топологии сети. Применение протокола IP позволяет реализовать сквозной мониторинг всей сети DPT, начиная от магистральной транспортной и заканчивая сетями доступа.

В качестве альтернативы АТМ и Frame Relay предлагается технология POS (*Packet over SDH/СЦИ*), позволяющая осуществлять инкапсуляцию пакетов IP непосредственно в кадры SDH/СЦИ. Технология POS, как и DPT, уже вышла на мировой телекоммуникационный рынок. Одним из ее достоинств является снижение доли служебной информации в общем объеме кадра передаваемой информации. По сравнению с технологией АТМ, для которой до 10 % объема ячейки АТМ занимает заголовок, служебные данные в кадре POS занимают всего 3 %.

6.3 Технологии временного мультиплексирования

Технология TDM (*Time Division Multiplexing* – временное мультиплексирование) позволяет передавать данные каналов, предоставляя им последовательно интервалы времени, в течение которых и осуществляется передача данных.

При временном уплотнении сигналов их передача осуществляется дискретно во времени. При этом между соседними дискретами одного сигнала всегда имеются “временные окна”, в которых нет передачи этого сигнала. Эти “окна” и заполняются дискретами других сигналов. В зависимости от того, в какой форме представлен дискрет каждого сигнала, возможны два вида временного уплотнения:

- уплотнение сигналов в аналого-импульсной форме;
- уплотнение сигналов в цифровой форме.

В первом случае каждый из сигналов многоканальной системы предварительно преобразуется из аналоговой формы в сигнал АИМ-1 или АИМ-2. Формирование АИМ-сигналов производится с помощью дискретизаторов, которые управляются соответствующими импульсами коммутации. Поскольку эти сигналы являются ортогональными (непересекающимися) во времени, то дискреты сигналов также не совпадают во времени и их можно непосредственно объединить в групповой сигнал с помощью линейного сумматора. Формирование сдвинутых во времени последовательностей импульсов осуществляется с помощью генераторного оборудования. Оно же с помощью передающего устройства синхросигналов формирует специальный сигнал синхронизации, который объединяется с выборками информационных сигналов. Элементарный цикл передачи в многоканальной системе строится по принципу: передается выборка 1-го канала, 2-го и т.д. до n -го, затем передается синхросигнал; потом снова выборки 1-го, 2-го канала и т.д.

На приемной стороне дискретизаторы осуществляют выделение из группового сигнала выборок только “своих” каналов. После канального фильтра происходит восстановление непрерывного сигнала из дискретного.

Канальные дискретизаторы на передающей и приемной сторонах должны работать синхронно и синфазно. Для этого применяется принудительная синхронизация приемной части. Она выполняется с помощью специального приемника синхросигнала, который из группового сигнала выделяет сигнал синхронизации и подает его на генераторное оборудование приема. Для безошибочного выделения синхросигнала последнему придаются специфические признаки, отличающие его от информационных выборок. Отличием может быть амплитуда, длительность, форма и т. п. Генераторное оборудование передачи и приема строятся почти одинаково, только задающий генератор на стороне передачи работает в автономном режиме, а на стороне приема – в режиме принудительной синхронизации. Преимущества такого варианта временного уплотнения заключаются в следующем:

- 1) для всех каналов используется общее генераторное оборудование;
- 2) все сигналы дискретизируются с одной частотой, что позволяет использовать однотипные дискретизаторы и канальные фильтры;

3) аналого-цифровое преобразование (операции квантования по уровню и кодирования) выполняются одним групповым квантователем и кодирующим устройством;

4) цифро-аналоговое преобразование на приемной стороне осуществляется одним групповым декодером, который формирует групповой дискретизированный сигнал.

Такой вариант временного уплотнения применяется в первичных цифровых системах передачи типа ИКМ-30.

Основными недостатками рассмотренного варианта временного уплотнения являются следующие:

- с ростом числа объединяемых сигналов уменьшается интервал времени между соседними выборками, за которое групповой кодер (или декодер) должен произвести преобразование в цифровой сигнал (и обратно), в силу чего усложняется реализация этих групповых устройств;

- затрудняется объединение с аналоговыми сигналами, частота дискретизации которых существенно отличается от “стандартной” $F_d = 8$ кГц;

- затрудняется объединение аналоговых и цифровых абонентских сигналов.

Для устранения этих недостатков ИТУ-Т рекомендует объединять подобным образом не более 30 аналоговых телефонных сигналов (по американским стандартам – не более 24).

Второй вариант временного уплотнения отличается тем, что объединение и разделение производится с двухуровневыми цифровыми сигналами. Здесь входные цифровые потоки, имеющие тактовую скорость F_t , объединяются в устройстве объединения (УО) в один суммарный цифровой поток, который имеет тактовую скорость в M раз превышающую F_t . На приемной стороне этот поток разделяется устройством разделения на M первичных (исходных) потоков. Различают два варианта объединения цифровых потоков:

- *синхронное*, когда исходные цифровые потоки синхронны по частоте и фазе (их тактовые скорости строго одинаковы);

- *асинхронное*, когда производится объединение цифровых потоков, у которых тактовые скорости несколько отличаются друг от друга (за счет использования независимого генераторного оборудования).

Есть несколько способов объединения: посимвольное, поканальное, посистемное. При посимвольном объединении каждый из исходных цифровых потоков поступает на соответствующую схему «И», на второй вход которой подается последовательность импуль-

сов той же частоты $F_\tau = 1/T_\tau$, но длительностью $\tau \leq T_\tau/M$. Эти последовательности сдвинуты друг относительно друга и не пересекаются во времени. На выходе схемы «И» получаем цифровой поток той же частоты, но с укороченными по времени символами, а на выходе схемы «ИЛИ» – суммарный поток, у которого на каждом интервале T_τ размещается M символов (по одному из каждого исходного цифрового потока).

Для разделения суммарного ЦП на исходные необходимо ввести в его состав сигнал синхронизации (СС). Если СС вводить после каждой группы по M информационных символов, то эффективность суммарного цифрового потока

$$\mathcal{E}_\Sigma = M/(M + C),$$

где C – число синхросимволов (компонентов сигнала синхронизации).

Даже при $C = 1$, что явно недостаточно для надежного выделения синхросигнала, и $M = 4$ получим $\mathcal{E}_\Sigma = 0,8$. Чтобы существенно повысить информационную эффективность суммарного потока, используют дополнительную ступень преобразования. Здесь суммарный поток, полученный путем синхронного объединения и имеющий скорость MF_τ поступает в блок буферной памяти. Считывание цифровой информации из памяти производится с частотой $f_{гр} > MF_\tau$, в результате блок цифровых символов объемом KM бит (K – целое число) передается за меньшее время. В освободившееся временное окно вставляется группа синхросигнала, содержащая q символов, следующих с той же частотой считывания $f_{гр}$. На выходе схемы «ИЛИ» получаем полный цифровой поток, содержащий как информационные, так и синхронизирующие символы.

Объединение асинхронных цифровых потоков предусматривает две ступени. На первой каждый из исходных цифровых потоков поступает на свой блок буферной памяти БП, при этом на выходах блоков получаем синхронные потоки с одинаковой тактовой частотой f_τ^* . На второй ступени осуществляется типовое объединение полученных потоков с помощью блока синхронного объединения. Здесь каждый блок асинхронного согласования на стороне передачи (БАС_{пд}) формирует цифровой поток с тактовой частотой $f_{гр}/M$. Он содержит на одних известных временных позициях ряд служебных символов, а на других, тоже известных позициях, – информационные символы первичного цифрового потока, который поступает на вход своего БАС_{пд} со

своей тактовой частотой f_{Tj} . В устройстве объединения синхронные преобразованные потоки посимвольно объединяются и формируют вторичный (групповой) цифровой поток с тактовой частотой следования $f_{Гр}$, которая соответствует стандартной цифровой иерархии. В оконечном пункте приема этот поток в устройстве разделения делится на M синхронных первичных преобразованных потоков, каждый из которых поступает на свой приемный блок асинхронного согласования. На выходе этого блока получаем снова исходный первичный поток со своей тактовой частотой f_{Tj} . Для правильного разделения генераторное оборудование приема синхронизируется по тактовой частоте $f_{Гр}$ и частоте следования синхросигнала с помощью приемника синхросигнала и выделителя тактовой частоты.

Совокупность таких устройств без учета генераторного оборудования часто называют: на стороне передачи – мультиплексором (MUX), на стороне приема – демультимплексором (DMX). В русскоязычной литературе эти устройства называют также оборудованием временного группообразования (ОВГ), добавляя при необходимости указание на то, какие групповые потоки образуются и на какой стороне: передачи или приема.

Главное требование, предъявляемое к ОВГ, – соблюдение принципа «прозрачности». Он заключается в том, что оборудование временного группообразования не должно накладывать никаких ограничений на структуру объединяемых цифровых сигналов. Соответственно последние должны передаваться по групповым трактам высших уровней без каких-либо изменений их структуры и тактовой частоты. Обычно тактовые частоты объединяемых близки друг к другу и почти равны номинальной частоте $f_{НОМ}$, однако каждая из них может независимо меняться в пределах $f_{Tj} = f_{НОМ}(1 \pm \delta f(t))$, где $\delta f(t)$ – относительная стабильность автономных генераторов, которые формируют эти потоки.

При одних и тех же номинальных значениях тактовых частот на входе и выходе БАС его построение можно выполнить различными способами. В первую очередь это зависит от выбора частоты преобразования (считывания) на первой ступени согласования f_T^* . На практике нашли применение два основных варианта. В первом выбирается $f_T^* = f_{НОМ}$, во втором $-f_T^* > f_{max} = f_{НОМ} (1 + \max |\delta f|)$. Для первого варианта необходимо проанализировать три ситуации: а) когда $f_T^* = f_T$; б) $f_T^* < f_T$; в) $f_T^* > f_T$.

При $f_T^* = f_T$ частота записи информационных символов в блок памяти равна частоте считывания f_T^* , при этом импульсные последовательности на входе и выходе практически не различаются между собой, если не считать постоянного сдвига во времени Δt . Такой случай соответствует режиму синхронного объединения.

При $f_T < f_T^*$ временной интервал между моментами записи и считывания уменьшается после каждого считывания на величину $\Delta T = T_3 - T_c$, где $T_3 = 1/f_T$; $T_c = 1/f_T^*$. Это уменьшение происходит до тех пор, пока не наступит момент, когда на интервале T_c не успевает появиться следующий информационный символ. Тогда в считанной импульсной последовательности повторится предыдущий символ. Такой повтор называют положительным временным сдвигом (ВС).

При $f_T > f_T^*$ временной интервал между моментами записи и считывания возрастает после каждого считывания на величину $\Delta T = T_c - T_3$. Наконец, наступит момент, когда за один период считывания в блок памяти поступят два информационных символа. Тогда в считанной последовательности оказывается потерянным один информационный импульс. Такая потеря называется отрицательным временным сдвигом.

Появление положительных и отрицательных ВС нарушает структуру преобразованного первичного потока, который отличается от исходного или тем, что в нем появились дополнительные неинформационные позиции, или тем, что, наоборот, оказалась потерянной часть информационных символов. Очевидно, в этом случае на приемной стороне по переданному преобразованному потоку невозможно правильно восстановить исходный поток, если не принять определенных мер, которые называют согласованием скоростей.

Процедура согласования скоростей включает в себя, во-первых, формирование в БАС_{пд} трех команд согласования скоростей (КСС, или так называемых стаффинг-команд), которые указывают, в каком режиме в настоящий момент работает БАС: синхронном ($f_T = f_T^*$), режиме положительных ($f_T < f_T^*$) или отрицательных ($f_T > f_T^*$) ВС. Во-вторых, формируется специальный сигнал коррекции, который в случае отрицательных ВС (отрицательного согласования скоростей) представляет собой тот самый «пропущенный» информационный символ, который потерялся бы при преобразовании. При положительных ВС (положительном согласовании скоростей) сигнал кор-

рекции указывает на появление «лишнего» неинформационного символа в преобразованном потоке.

Сигналы КСС и сигналы коррекции должны передаваться на строго определенных служебных позициях, отведенных в цикле преобразованного первичного потока. На приемной станции (в БАСпр) при приеме КСС и сигнала коррекции о положительном согласовании скоростей происходит «вычеркивание» лишнего неинформационного импульса при записи преобразованного первичного потока в блок памяти. Если КСС и сигнал коррекции соответствуют отрицательному согласованию скоростей, то тогда сигнал коррекции записывается в блок памяти в качестве пропущенного информационного символа.

6.4 Технологии волнового мультиплексирования

Технологии WDM и DWDM сравнительно новые сетевые технологии для ВОЛС, основанные на спектральном уплотнении оптического излучения по длине волны. Физико-технические основы спектрального уплотнения оптического излучения для систем передачи и обработки информации были разработаны в 1970–80 гг. В настоящее время технология DWDM является основой построения оптических сетей и играет для систем SDH/СЦИ роль аналогичную той, что и мультиплексирование с частотным разделением каналов для АСП, хотя механизмы мультиплексирования в них различные.

В рамках многоуровневой модели взаимодействия базовых сетевых технологий SDH/СЦИ, WDM/DWDM, ATM, IP их взаимосвязь можно представить в виде рисунка 6.2.



Рисунок 6.2 – Вариант архитектуры интегрированной мультисервисной перспективной IP-сети

При этом, так как оптика уже встроена во многие сетевые устройства (коммутаторы/маршрутизаторы IP, аппаратуру GE, MBB/ADM,

DWDM) применение технологии DWDM позволяет напрямую сопрягать интерфейсы ATM, GE или IP с физическими интерфейсами оптической среды передачи (оптическим волокном). На рисунке 6.3 приведена инфраструктура оптических сетей, где показаны варианты типичной архитектуры современных сетей.

Несмотря на достаточно большой срок от начала разработки систем и мультиплексоров WDM, время их признания как конкурентной сетевой технологии фактически пришло недавно, когда появились первые полнодуплексные 4-канальные системы с разносом несущих 800–400 ГГц. За последние три года аппаратуру WDM/DWDM стали широко применять на сетях операторов дальней связи. Выпускаемая аппаратура WDM/DWDM позволяет объединять в одном оптическом волокне до 40 и более оптических каналов, а некоторые промышленные системы DWDM позволяют объединять до 128–160 каналов.

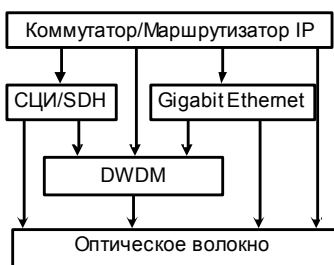


Рисунок 6.3 – Сетевая инфраструктура оптических сетей связи

Технологии DWDM, в отличие от WDM (в которой обычно используются окна прозрачности 1310 и 1550 нм или дополнительно область длин волн в окрестности 1650 нм), присущи две важные особенности:

- использование только одного окна прозрачности 1550 нм в пределах области длин волн (1530–1560 нм) усиления оптических волокон, легированных эрбием;
- малые интервалы по длине волны $\Delta\lambda$ между мультиплексируемыми каналами, обычно равные 3,2/1,6/0,8 или 0,4 нм.

Мультиплексоры DWDM рассчитаны на работу с большим числом каналов (до 32 и более) со строго определенными длинами волн и обеспечивают возможность мультиплексирования (демультиплекси-

рования) одновременно как всех каналов, так и для ввода/вывода одного или нескольких каналов из общего оптического потока с большим числом каналов. Выходные оптические интерфейсы (порты) демультиплексора DWDM закреплены за определенными длинами волн, поэтому говорят, что такое устройство осуществляет пассивную маршрутизацию по длинам волн. Из-за малой разницы в длине волн каналов и необходимости работы с большим числом каналов одновременно, мультиплексоры DWDM требуют существенно большей прецизионности в изготовлении по сравнению с мультиплексорами WDM. Все это приводит к более высокой стоимости аппаратуры DWDM по сравнению с WDM. Структурная схема системы DWDM (рисунок 6.4) включает следующие основные блоки: транспондеры (приемопередатчики), оптические мультиплексоры/демультиплексоры MUX/DEMUX, усилители (в составе аппаратуры DWDM), линейные усилители и стабильные источники.

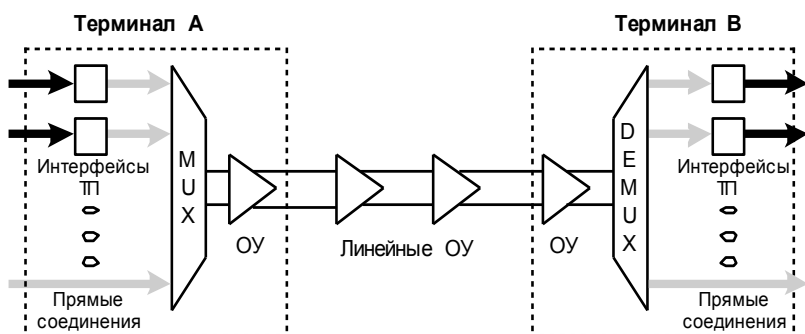


Рисунок 6.4 – Структура системы DWDM: ОУ – оптический усилитель; MUX – оптический мультиплексор; DEMUX – оптический демультиплексор; ТП – транспондер

В системах WDM/DWDM применяются вполне определенные диапазоны длин волн оптического излучения в пределах, рекомендованных МСЭ-Т (таблица 6.3). Системы WDM с шагом каналов по частоте более 200 ГГц позволяют мультиплексировать не более 16 каналов. Системы DWDM с шагом каналов по частоте, равным 100 ГГц, позволяют мультиплексировать не более 64 каналов. Системы HDWDM с шагом каналов по частоте менее 50 ГГц позволяют мультиплексировать более 64 каналов.

Таблица 6.3 – Спектральные диапазоны длин волн для одномодового оптического волокна

| Обозначение диапазона | Наименование диапазона | Диапазон длин волн, нм |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| O | Основной | 1260–1360 |
| E | Расширенный | 1360–1460 |
| S | Коротковолновой | 1460–1530 |
| C | Стандартный | 1530–1565 |
| L | Длинноволновой | 1565–1625 |
| U | Сверхдлинноволновой | 1625–1675 |

Основным параметром в технологии DWDM является интервал в длинах волн оптического излучения соседних каналов. Стандартизация пространственного распределения оптических каналов является основой для возможности тестирования на взаимную совместимость оборудования разных производителей. В Рекомендации G.692 ITU-T определен частотный план систем DWDM с разнесением частот между соседними каналами 100 ГГц, что соответствует интервалу по длине волны $\Delta\lambda \approx 0,8$ нм (таблица 6.4). Продолжает обсуждаться возможность принятия частотного плана с еще меньшим частотным интервалом 50 ГГц ($\Delta\lambda \approx 0,4$ нм).

В таблице 6.4 показаны сетки частотного плана 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 (2,4 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 6.5). Видно, 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, что ведет к увеличению ее стоимости.

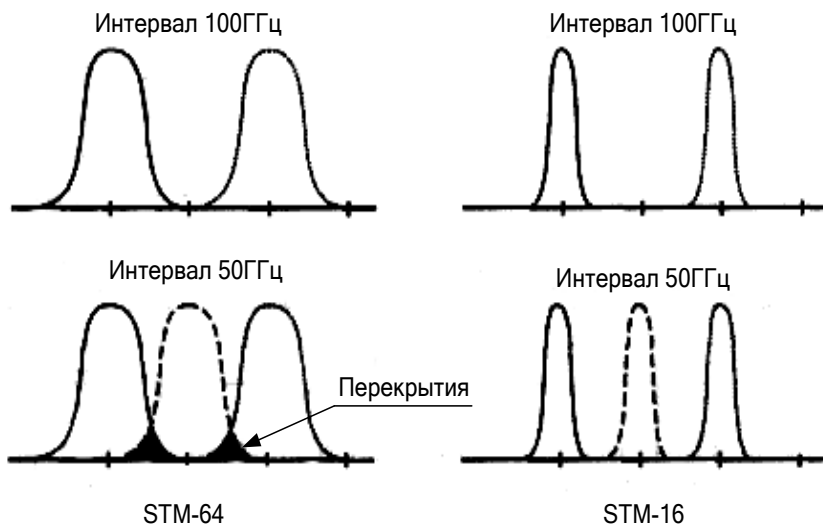


Рисунок 6.5 – Спектральное размещение каналов разного уровня в оптическом волокне

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.

Таблица 6.4 – 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 |

Окончание таблицы 6.4

| Частота оптической несущей, ТГц | Частотный интервал, ГГц | | | | | | Длина волны, нм |
|---------------------------------|-------------------------|-----|-----|---------|-----|------|-----------------|
| | 100 | 200 | 400 | 400/500 | 600 | 1000 | |
| 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 |

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.

Число каналов, которое можно разместить в стандартном диапазоне длин волн, реализуемых в полосе усиления оптических усилителей 5,1 ТГц, представлено в таблице 6.5, где в верхней строке указаны частотные интервалы или шаги сетки частотного плана, а в двух

нижних – соответствующие ему максимальные числа каналов N и числа каналов NJ , выбираемые по схеме шага, кратного 2^N .

Таблица 6.5 – Оценка максимального числа каналов систем DWDM

| Частотный интервал, ГГц | 1000 | 600 | 500 | 400 | 200 | 100 | 50 |
|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Число каналов N | 5 | 8 | 10 | 12 | 25 | 51 | 102 |
| Число каналов NJ | 4 | 8 | 8 | 8 | 16 | 32 | 64 |

Из таблиц 6.4 и 6.5 видно, что схема частотного плана с числом каналов кратным 2^N , которой придерживается ряд производителей аппаратуры DWDM, нерациональна при использовании стандартизованной полосы усиления оптических усилителей EDFA. В окончательной редакции Рекомендации G.692 ITU-T допускается максимально не более 41 канала для частотного интервала 100 ГГц и не более 81 канала для частотного интервала 50 ГГц. Эти показатели максимального числа каналов уже перекрыты целым рядом компаний, производящих аппаратуру DWDM с 160 (*Lucent Technologies, Siemens, ECI Telecom* и др.) и 250 (*Alcatel*) каналами.

6.5 Оборудование систем передачи с временным уплотнением

6.5.1 Оконечное оборудование

В настоящее время оборудование SDH/СЦИ является наиболее распространенным оборудованием с временным уплотнением. Оно строится по принципу функциональных модулей, к которым относятся мультиплексоры, концентраторы, регенераторы и коммутаторы. Функциональные модули связаны между собой средой передачи и определенными логическими связями. Эти связи формируют топологию, или архитектуру, сети SDH/СЦИ.

Мультиплексоры являются основным функциональным модулем сетей SDH/СЦИ. Они выполняют сборку (мультиплексирование) высокоскоростного потока STM-N из низкоскоростных компонентных потоков PDH/ПЦИ или SDH/СЦИ в тракте передачи и разборку (демультиплексирование) высокоскоростного потока STM-N с целью выделения низкоскоростных потоков в тракте приема (рисунок 6.6). Высокоскоростной оптический сигнал поступает на линейный выход мультиплексора, называемый агрегатным выходом. Агрегатный вы-

ход, выполняющий функцию канала передачи/приема, содержит оптический передатчик и оптический приемник, которые подключаются к оптическим волокнам с помощью порта.

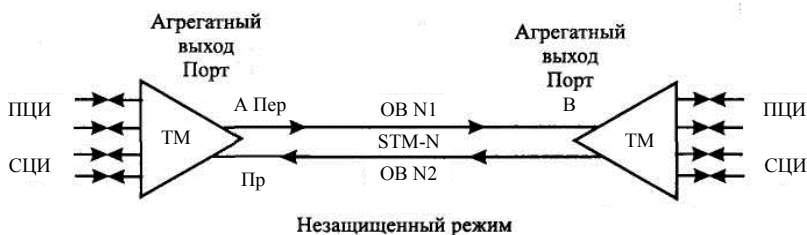


Рисунок 6.6 – Связь между терминальными мультиплексорами

Мультиплексоры в силу своей универсальности и гибкости могут выполнять функции концентратора и коммутатора потоков, а также регенератора параметров сигналов. Компонентные потоки каналов PDH/ПЦИ подключаются непосредственно к портам трибных (иногда называемых трибутарными) блоков мультиплексоров. Поэтому в дополнение к перечисленным выше функциям они обеспечивают сопряжение сетей пользователей с сетью SDH/СЦИ. Указанные возможности реализуются за счет модульного принципа построения мультиплексоров путем подбора модулей для каждого конкретного случая использования мультиплексора при организации сетей.

Входящие в состав мультиплексоров интерфейсы, которые осуществляют передачу и прием компонентных сигналов, называют трибными, а передачу и прием линейных сигналов – агрегатными. Мультиплексоры komponуются трибными интерфейсами, предназначенными, как правило, для электрических сигналов. Однако для удаленных пользователей могут потребоваться и оптические. Для потоков STM-4, STM-16 выпускаются оптические агрегатные интерфейсы, а для STM-1 – оптические и электрические.

В зависимости от выполняемых функций мультиплексоры подразделяются на терминальные (оконечные) и мультиплексоры ввода-вывода.

Терминальный мультиплексор ТМ (см. рисунок 6.6) выполняет в тракте передачи ввод компонентных сигналов со стороны трибных интерфейсов, мультиплексирование их до уровня STM-N и передачу в агрегатный линейный интерфейс. В тракте приема ТМ осуществ-

ляет демультиплексирование пришедшего из агрегатного линейного интерфейса сигнала в формате STM-N до уровня компонентных потоков и направляет их на выходы трибных интерфейсов. ТМ может вводить каналы, т. е. коммутировать их со входов трибных интерфейсов на линейный выход, или выводить каналы, т. е. коммутировать их с линейного входа на выход трибного интерфейса. ТМ также позволяет производить локальную коммутацию входа одного трибного интерфейса на выход другого для компонентных сигналов уровней 1,5 и 2 Мбит/с. Соответствие трибных интерфейсов для входных сигналов агрегатным интерфейсам мультиплексоров приведено в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Соответствие трибных интерфейсов для входных сигналов агрегатным интерфейсам мультиплексоров

| Агрегатные интерфейсы/ скорость передачи, Мбит/с | Трибные интерфейсы для сигналов | |
|---|---------------------------------|----------------|
| | ПЦИ, Мбит/с | СЦИ, Мбит/с |
| STM-1/155 | 1,5; 2; 6; 34; 45; 140 | – |
| STM-4/622 | 1,5; 2; 6; 34; 45; 140 | 155 |
| STM-16/2500 | 1,5; 2; 6; 34; 45; 140 | 155; 622 |
| STM-64/10000 | 1,5; 2; 6; 34; 45; 140 | 155; 622; 2500 |

Для повышения надежности и устойчивого функционирования сети SDH/СЦИ в ТМ устанавливаются два оптических агрегатных выхода (рисунок 6.7, а). Каждый из них выполняет функцию канала передачи/приема и подключается к оптическим волокнам с помощью портов А и В. Это позволяет обеспечить создание режима 100%-ного резервирования, который называется также защитой по схеме «1 + 1».

При линейной топологии сети типа «точка/точка» агрегатные выходы ТМ обозначаются как основной и резервный (рисунок 6.7, б). Чтобы реализовать функцию передачи/приема к основному порту, подключаются ОВ, например, № 1 и 2, а к резервному – ОВ № 7 и 8. При выходе из строя основного канала выполняется переключение на резервный.

Для обеспечения 100%-ного резервирования типа «1 + 1» в ТМ, включенных в кольцевую схему, также используются два агрегатных выхода или порта А и В. Они обозначаются на схеме связи, как «запад» и «восток» (рисунок 6.8), это означает, что сигнал распространяется от ТМ по кольцу влево или вправо.

Если резервирование не используется (так называемый незащищенный режим), то в мультиплексоре ТМ работает один агрегатный выход (см. рисунок 6.6).

Мультиплексоры ввода-вывода (*Add/Drop Mux*) ADM устанавливаются в тех узлах сети, где необходимо осуществить ввод и вывод потоков, представляющих собой компонентные сигналы PDH/ПЦИ или SDH/СЦИ, без полного демультиплексирования всего потока STM-N (рисунок 6.9). ADM выполняет ввод каналов, т. е. коммутацию со входа трибного интерфейса на выходы агрегатных интерфейсов, вывод каналов, т. е. коммутацию со входов агрегатных интерфейсов на выход трибного интерфейса, а также сквозную коммутацию выходных потоков в обоих направлениях (например, на уровне контейнеров VC-4 в потоках, поступающих с линейных выходов).

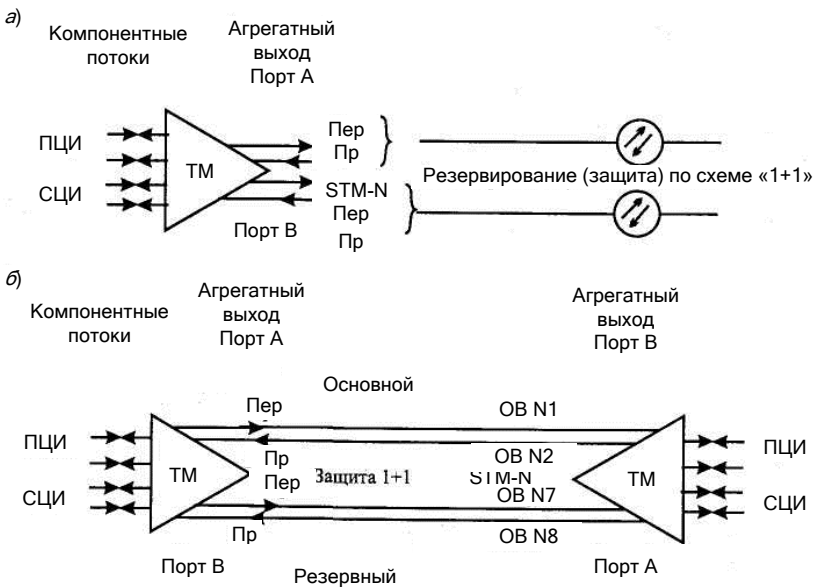


Рисунок 6.7 – Агрегатные выходы терминальных мультиплексоров

Для включения в сеть SDH/СЦИ ADM имеет два агрегатных выхода (канала передачи/приема), которые обозначаются на схеме как «Запад» и «Восток». Мультиплексор позволяет производить также переключение канала приема на канал передачи в любом из агрегатных блоков «Запад» или «Восток» при выходе из строя другого направления. Выпускаются мультиплексоры ADM, в которых возмож-

но (в случае его аварийного выхода из строя) пропускать оптический поток по обходному пути. Поэтому при проектировании сетей необходимо учитывать, чтобы предыдущий мультиплексор имел запас мощности оптического излучения для перекрытия суммы затуханий предыдущего и последующего участков.

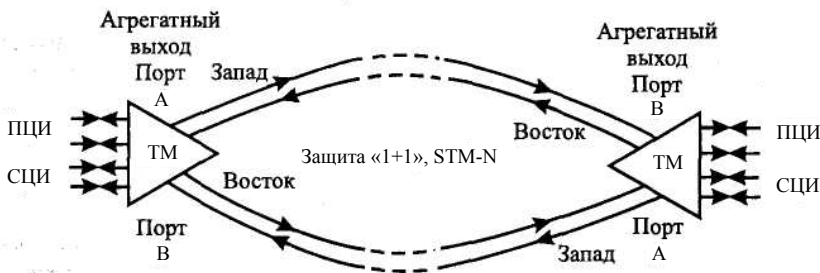


Рисунок 6.8 – Включение терминальных мультиплексоров в кольцевую структуру

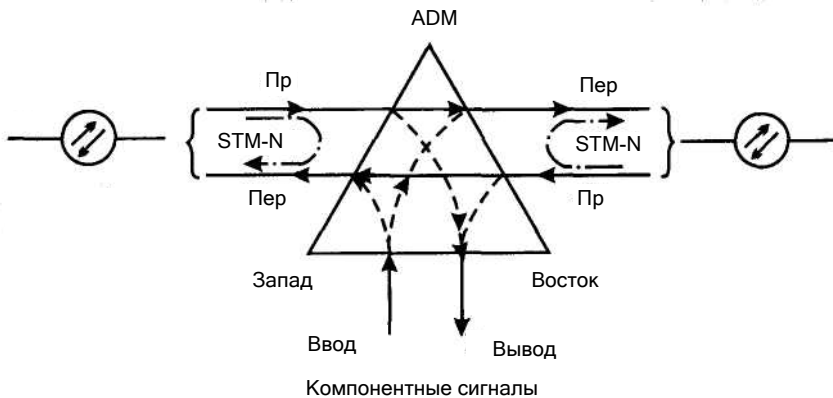


Рисунок 6.9 – Мультиплексор ввода-вывода

Концентратор представляет собой мультиплексор, объединяющий в один распределительный узел сети SDH/СЦИ несколько, как правило, однотипных со стороны входных портов потоков (например, PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ), которые поступают от удаленных узлов (рисунок 6.10). Чтобы обеспечить подключение к основному потоку двух и более внешних ветвей или организовать от него ответвление, концентратор должен иметь 3, 4 или большее количество линейных портов типа STM-N или STM-(N-1). То есть концентратор позволяет

уменьшить общее число каналов, подключенных к основной транспортной сети SDH/СЦИ, и предоставляет возможность удаленным узлам обмениваться между собой потоками информации, не загружая трафик основной транспортной сети. Таким образом, концентраторы способны развивать сеть SDH/СЦИ, не изменяя конфигурацию информационных потоков в ней.

Регенератор используется для увеличения допустимого расстояния между узлами сети SDH/СЦИ (рисунок 6.11). Это достигается за счет регенерации (усиления и коррекции параметров) линейного сигнала, предварительно преобразованного из оптического в электрический. Регенерация выполняется путем восстановления амплитуды, формы, длительности, местоположения импульсов сигнала. При этом в регенераторе не происходит демультиплексирования сигналов STM-N и выделения или ввода компонентных потоков. Регенератор имеет два агрегатных порта «Восток»/«Запад» или четыре (в случае применения защиты по схеме «1 + 1»).

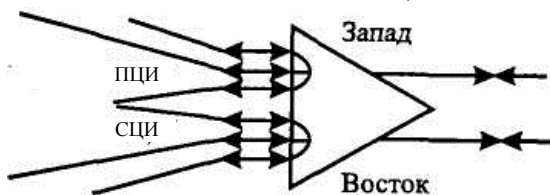
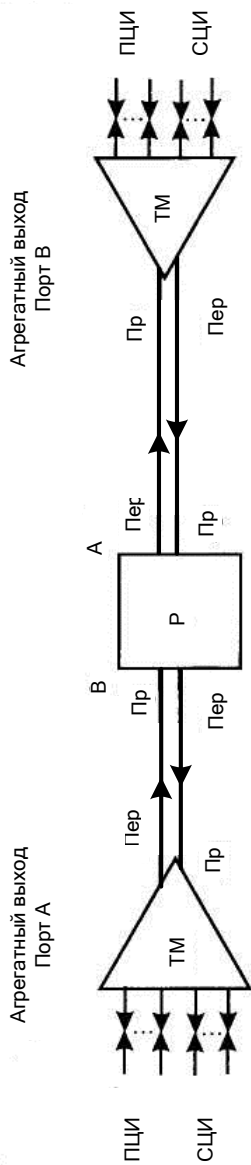


Рисунок 6.10 – Концентратор

Основным оборудованием сетей SDH/СЦИ является универсальный синхронный мультиплексор (УСМ). Он может трансформироваться в любой из функциональных модулей: терминальный мультиплексор, мультиплексор ввода/вывода, регенератор или концентратор. Обобщенная структурная схема УСМ приведена на рисунке 6.12. В состав мультиплексора входят: 2 агрегатных блока с выходными двунаправленными портами А и В для формирования выходных потоков STM-N. Каждый блок состоит из оптических агрегатов ОА и мультиплексоров MUX. ОА выполняет прием оптических сигналов и преобразование их в электрические, а также обратное преобразование сформированных в мультиплексорах MUX выходных потоков в оптический сигнал. Блоки MUX подключены к коммутатору К. Они могут соединяться между собой в автоматическом режиме для организации обходного пути в случае неисправности мультиплексора.



Незацищенный режим

Агрегатный выход Порт А

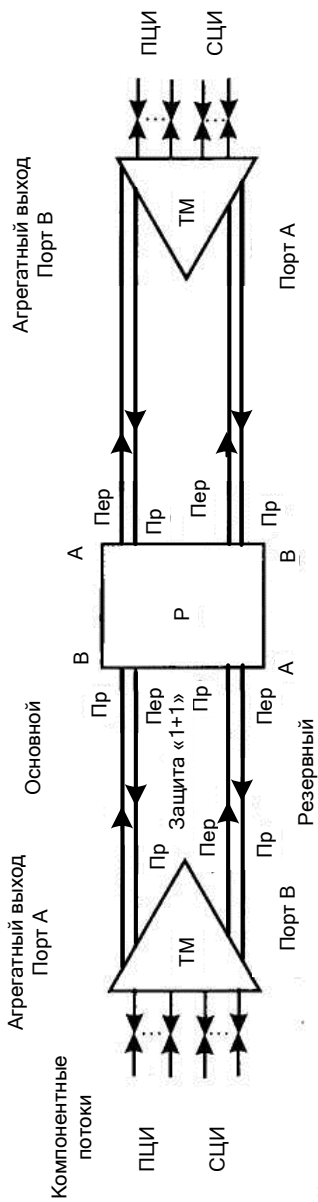


Рисунок 6.11 – Включение регенератора в линию связи

Коммутатор служит для распределения и переключения поступающих на него потоков. Он выполняет функцию кросс-коммутации между цифровыми сигналами, приходящими из линий А и В, а также сигналами, поступающими от потребителей, которые обрабатываются в трибутарных блоках. Коммутатор может осуществлять локальные переключения, при которых компонентный сигнал одного трибутарного блока переключается на другой трибутарный блок. Такие переключения необходимы при использовании мультиплекса в сети топологии «звезда» или в качестве концентратора сигналов с разных направлений.

Трибутарные блоки, называемые также трибами, выпускаются для конкретных типов стандартных стыков электрических и оптических сигналов.

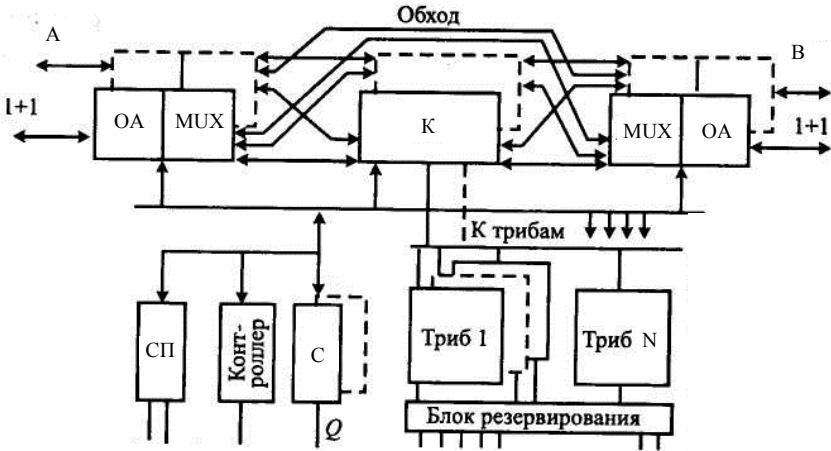


Рисунок 6.12 – Обобщенная структурная схема универсального синхронного мультиплексора

Контроллер является главным управляющим элементом УСМ. Он выполняет всю необходимую обработку служебной информации для конфигурации и управления мультиплексором. Контроллер имеет соединения со всеми блоками УСМ и интерфейс для подключения локального терминала (компьютера).

К сервисным блокам мультиплексора относятся плата связи С и служебная плата СП. Плата С обеспечивает интерфейс Q на внешние устройства сетевого управления и маршрутизацию сообщений меж-

ду каналами в системе управления. Плата СП осуществляет передачу дополнительной служебной информации между мультиплексорами в кольцевых или цепочечных структурах. Она позволяет организовать передачу как речевых сообщений обслуживающего персонала, так и телеметрической информации с внешних устройств.

На схеме штриховыми линиями показана возможность установки дополнительных агрегатных блоков и коммутатора для резервирования по схеме «1 + 1», а также трибных блоков – по схеме «N : 1». Для резервирования трибов необходимо устройство защитного переключения, заменяющее неисправный блок по заданной программе.

При использовании синхронного мультиплексора в качестве любого из указанных функциональных модулей – терминального мультиплексора, мультиплексора ввода/вывода, концентратора и регенератора – в его состав входит контроллер, в котором содержится информация о конфигурации мультиплексора. В режиме регенератора к нему добавляются два агрегатных блока.

В терминальном мультиплексоре в дополнение к контроллеру устанавливаются коммутатор, трибутарные блоки и один агрегатный блок (при работе в незащищенном режиме). Резервирование по схеме «1 + 1» потребует включения дополнительного агрегатного блока.

6.5.2 Оборудование промежуточного пункта

Основным элементом цифрового линейного тракта является участок регенерации, представляющий собой совокупность участка кабельной линии и подключенного к его выходу регенератора. Линейные регенераторы (РЛ) размещаются в необслуживаемых регенерационных пунктах (НРП), которые в зависимости от конструкции контейнера могут устанавливаться на открытом воздухе, в грунте или специальных колодцах. Все РЛ идентичны независимо от типа используемого контейнера НРП и направления передачи. На оконечных и промежуточных станциях, где устанавливается аппаратура выделения каналов, а также в обслуживаемых регенерационных пунктах (ОРП) регенератор, включенный в тракт приема (станционный регенератор), отличается от линейного только конструктивным исполнением. Питание устройств НРП осуществляется дистанционно

от оконечных станций или обслуживаемых регенерационных пунктов, расстояние между которыми определяется схемой организации дистанционного питания (ДП) и его максимальным напряжением. Таким образом, цифровой линейный тракт обеспечивает не только формирование, передачу и прием цифрового линейного сигнала, но и дистанционное питание, а также телеконтроль НРП и служебную связь между оконечным и промежуточным оборудованием.

В процессе передачи по линии импульсы цифрового сигнала претерпевают затухание, искажаются по форме и подвергаются воздействию различных помех. Компенсация искажений, возникающих в линейном тракте, осуществляется регенераторами, которые включаются через определенное расстояние. Так как регенераторы являются необслуживаемыми устройствами, а количество их в линейном тракте ЦСП велико, предъявляются жесткие требования к их надежности и экономичности.

Рассмотрим работу регенератора на примере РЛ аппаратуры ИКМ-30, схема которого приведена на рисунке 6.13. Возьмем отрезок времени в семь тактовых интервалов цифрового линейного сигнала структуры «...0110111...». Ослабленные и искаженные импульсы линейного сигнала совместно с действующими на регенерационном участке помехами поступают на вход линейного корректора ЛК (рисунок 6.14, *а*), осуществляющего коррекцию формы принимаемых импульсов и их усиление.

В состав ЛК входят корректирующий усилитель КУ, корректирующий форму принимаемых импульсов при максимальном затухании кабельной линии, и регулируемая искусственная линия РИЛ, дополняющая затухание регенерационного участка до максимального значения. Устройство автоматической регулировки уровней АРУ управляет работой РИЛ, обеспечивая постоянную амплитуду импульсов на выходе линейного корректора при изменении затухания кабельной цепи вследствие сезонных колебаний температуры грунта.

Импульсы на выходе КУ имеют форму, близкую к колоколообразной (рисунок 6.14, *б*), длительность их по основанию равна двум тактовым интервалам $2T$, а на уровне половины амплитуды – тактовому интервалу T . Тогда в момент максимальной амплитуды какого-либо импульса соседние импульсы теоретически должны принимать нулевые значения.

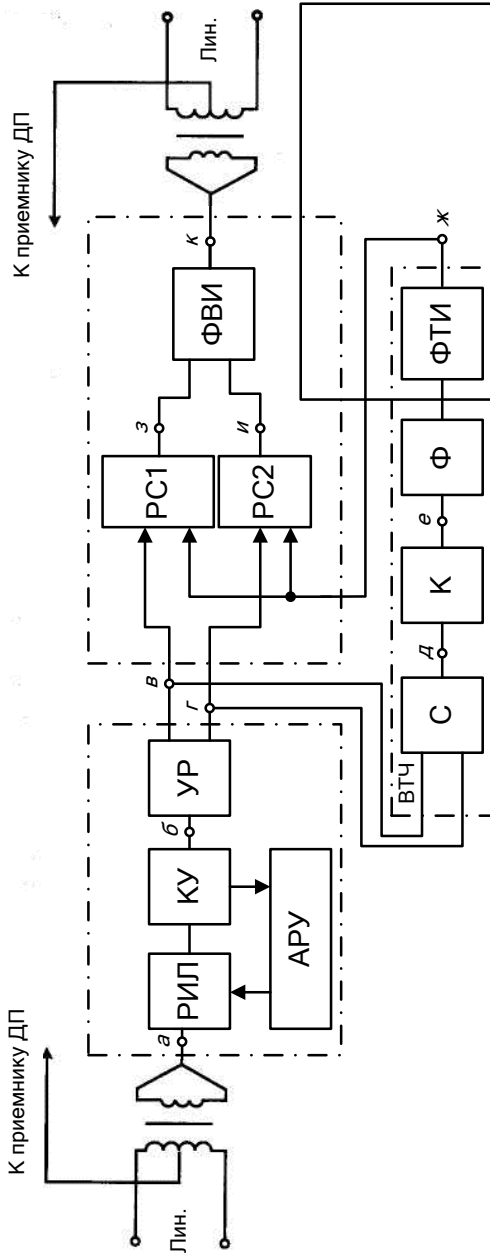


Рисунок 6.13 – Структурная схема регенератора

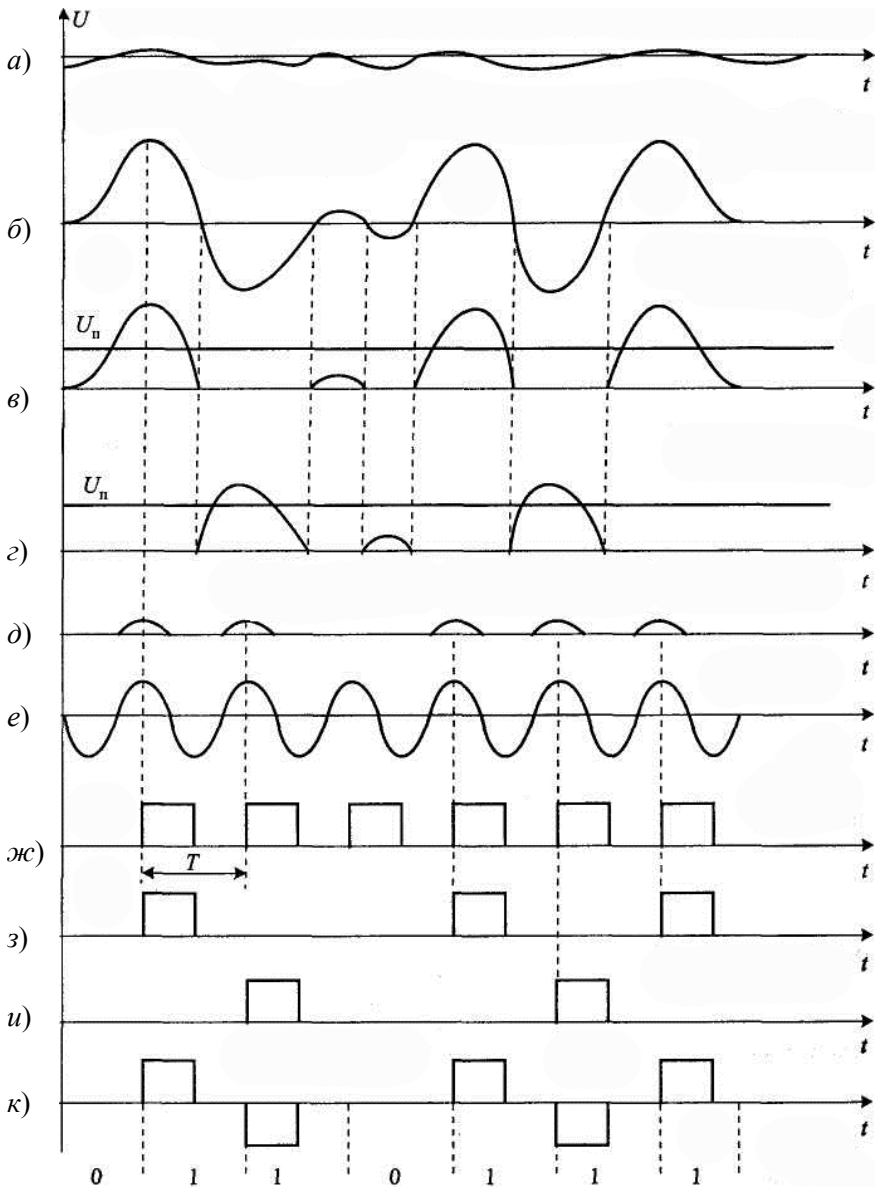


Рисунок 6.14 – Функционирование регенератора

Скорректированный в КУ двухполярный сигнал в устройстве разделения УР разделяется на две однополярные последовательности положительных (рисунок 6.14, *в*) и инвертированных отрицательных (рисунок 6.14, *з*) импульсов, которые поступают на входы одинаковых решающих схем РС1 и РС2, осуществляющих опознавание принятых импульсов в короткие интервалы времени (стробирование). Если сумма амплитуд импульса и помехи в момент стробирования превышает пороговое напряжение $U_{п}$ решающей схемы, то принимается решение о формировании прямоугольного импульса, по форме, длительности и временному положению, соответствующего исходному импульсу. В случае, если амплитуда импульса и помехи в момент стробирования меньше $U_{п}$, принимается решение о передаче нуля. Восстановленные последовательности положительных и инвертированных отрицательных импульсов (рисунок 6.14, *з*, *и*) объединяются в формирователе выходных импульсов ФВИ и поступают на вход следующего регенерационного участка (рисунок 6.14, *к*).

Прямоугольные импульсы, управляющие работой РС, формируются устройством выделения тактовой частоты ВТЧ. К ВТЧ относятся схема совпадения С, на выходе которой объединяются ограниченные снизу (рисунок 6.14, *д*) последовательности положительных и инвертированных отрицательных импульсов, контур ударного возбуждения К, выделяющий из этой последовательности колебание тактовой частоты (рисунок 6.14, *е*), фазовращатель Ф и формирователь тактовых импульсов ФТИ, где из полученного колебания вырабатывается управляющая последовательность (рисунок 6.14, *жс*). Частота следования импульсов этой последовательности равна тактовой частоте следования импульсов цифрового сигнала, а их скважность равна 2.

Временное положение передних фронтов импульсов управляющей последовательности (рисунок 6.14, *жс*) определяет момент стробирования и временное положение переднего фронта регенерируемых импульсов. Временное положение спада импульсов управляющей последовательности (заднего фронта) фиксирует конец регенерируемых импульсов, определяя их длительность. Моменты стробирования обычно приходится на середину принимаемого импульса, что соответствует его максимальной амплитуде и обеспечивает наибольшую вероятность правильного опознавания. Настройка осуществляется при помощи фазовращателя Ф.

В идеальном случае восстановленная импульсная последовательность на выходе регенератора в точности повторяет исходную последовательность импульсов линейного сигнала. Практически последовательность восстановленных импульсов отличается от исходной из-за ошибок при регенерации за счет воздействия помех.

Для уменьшения вероятности ошибки при принятии решения величина порогового напряжения устанавливается равной половине амплитуды входного импульса. Таким образом, помеха, не превысившая половины амплитуды входного сигнала, не вызовет ошибочного решения регенератора, а импульс, амплитуда которого под влиянием помех уменьшилась не более чем вдвое, будет полностью восстановлен. Помеха, превышающая U_n и не совпадающая с моментом стробирования, также не вызовет ошибочной регенерации.

Надежность работы цифрового ЛТ в значительной степени зависит от работы устройств синхронизации регенератора, которые обеспечивают выделение тактовой частоты, необходимой для управления процессом регенерации, непосредственно из принимаемой последовательности импульсов. Отклонение тактовой частоты приводит к изменению временных положений восстановленных импульсов – фазовому дрожанию или «джиттеру». Величина фазовых дрожаний зависит от помех, действующих на регенерационном участке, статистических характеристик цифрового линейного сигнала и от свойств схемы выделения тактовой частоты регенератора. Джиттер оказывает значительно меньшее влияние на коэффициент ошибок одиночного регенератора, чем другие виды помех. Более важным является его накопление при передаче импульсов линейного сигнала через цепь последовательно включенных регенераторов. При этом каждый регенератор обрабатывает импульсы, фазовые дрожания которых определяются предыдущими регенераторами. Влияние фазовых дрожаний тем больше, чем выше скорость передачи сигнала по линии передачи.

При воздействии помех амплитуда и форма импульсов изменяются, что приводит к уменьшению «раскрывания» и, следовательно, понижает вероятность безошибочной регенерации, коэффициент ошибок увеличивается.

Минимальное отношение сигнал/помеха, при котором обеспечивается заданный коэффициент ошибок, называется помехоустойчивостью регенератора.

6.6 Оборудование систем передачи со спектральным уплотнением

В качестве примера рассмотрим вариант системы передачи со спектральным разделением каналов, предназначенный для применения на ВОК, соответствующим рекомендациям МСЭ-Т G.652, G.653 и G.655. Аппаратура системы может использоваться с оптическими мультиплексорами на 40 длин волн с возможностью расширения до 80 длин волн. Она отвечает рекомендациям МСЭ-Т, стандартам ETSI.

Структурная схема аппаратуры оконечной станции приведена на рисунке 6.15.

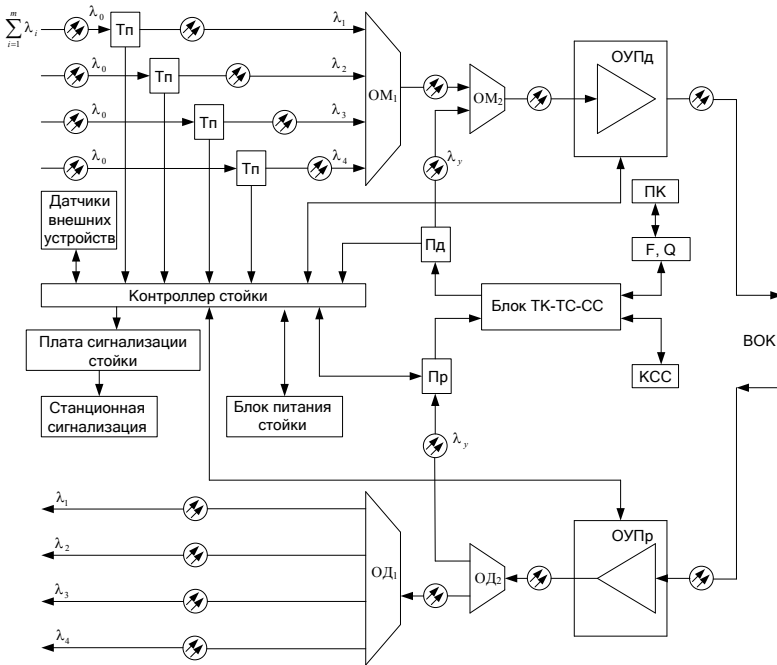


Рисунок 6.15 – Структурная схема оконечной стойки

Схема соединений между компонентами стойки промежуточного оптического усилителя приведена на рисунке 6.16. В пункте транзита устанавливаются две стойки оконечного пункта и между выходами и входами оптических каналов организуются либо транзитные соединения, либо вывод и ввод ответвляемых оптических каналов.

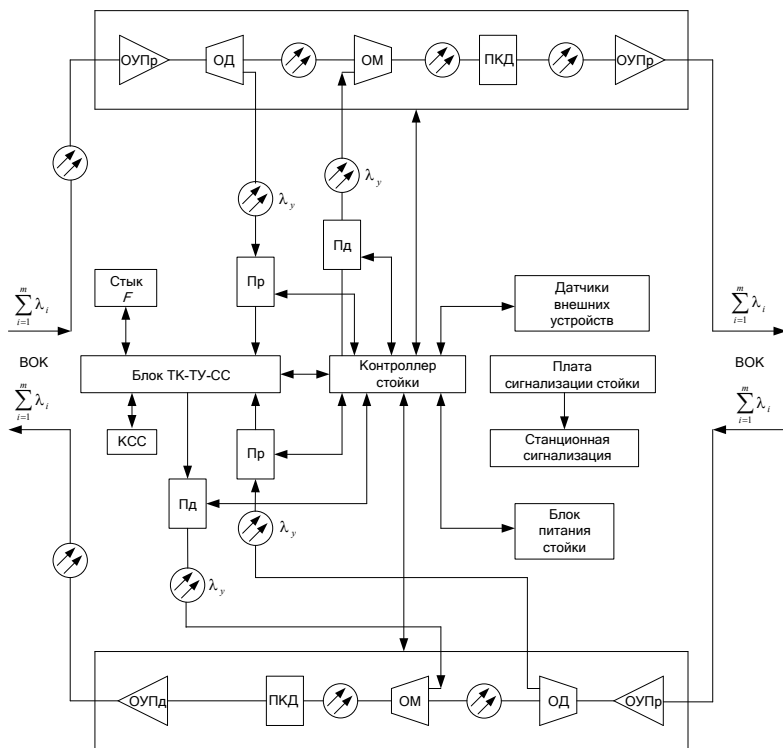


Рисунок 6.16 – Структурная схема промежуточного усилителя

Аппаратура спектрального уплотнения обеспечивает передачу цифровых сигналов SDH/СЦИ и АТМ или других технологий передачи информации в каждом оптическом канале со скоростью передачи до 10 Гбит/с включительно в диапазоне длин волн от 1530 до 1580 нм. В ней предусмотрена возможность автоматического тестирования без перерыва связи отдельных элементов и узлов для определения правильности функционирования аппаратуры. Контролируется и управляется аппаратура с помощью встроенных микропроцессорных устройств и специализированного программного обеспечения. Имеет стыки с рабочей станцией и местным терминалом системы обслуживания, а также со станционной сигнализацией. Для контроля и управления, а также для служебной связи, используется специальный (выделенный) оптический канал контроля.

Стойка усилительного пункта предназначена для установки в неотапливаемых помещениях НУП и включает в себя: оптические усилители передачи (ОУПд), оптические усилители приема (ОУПр), оптические мультиплексоры (ОМ₁, ОМ₂); оптические демультиплексоры (ОД₁, ОД₂), пассивные компенсаторы дисперсии (ПКД). В состав стойки также входят: блок системы телеконтроля-телеуправления и служебной связи (ТК-ТУ-СС), блок контроллера стойки, блок питания стойки, панель общестоечной сигнализации, комплект служебной связи (КСС), персональный компьютер (ПК). Блоки стойки снабжены встроенными устройствами сигнализации, контроля и управления (контроллерами).

6.7 Линейный тракт цифровых систем передачи

6.7.1 Регенераторы оптических сигналов

Оптические сигналы при распространении по волокну ослабляются вследствие потерь мощности в самом волокне, а также потерь в соединениях строительных длин и оконечных разъемных соединителях в местах подключения аппаратуры. Кроме того, дисперсия составляющих сигнала приводит к искажению сигнала в целом. Поэтому для увеличения дальности связи в ВОЛП вдоль линейного тракта через определенные расстояния определяемым затуханием и дисперсией в волокне устанавливаются ретрансляционные устройства: линейные регенераторы и оптические усилители.

Простейшие оптико-электронные регенераторы (повторители), чтобы восстановить оптические сигналы на протяженной ВОЛС, считывают их с волокна, преобразуют в электрические сигналы, усиливают и восстанавливают (корректируют) их продолжительность, преобразуют усиленные электрические сигналы снова в оптические и передают дальше по линии связи (рисунок 6.17).

Особенность регенератора состоит в том, что на его вход поступает сигнал, в котором аккумулированы все виды линейных искажений (см. рисунок 6.17).

После преобразования оптических сигналов в электрические и электронного усиления и электрического восстановления его временных параметров (продолжительности отдельных цифровых сигналов) с выхода регенератора поступает в волокно практически идеальная последовательность двоичных оптических сигналов.

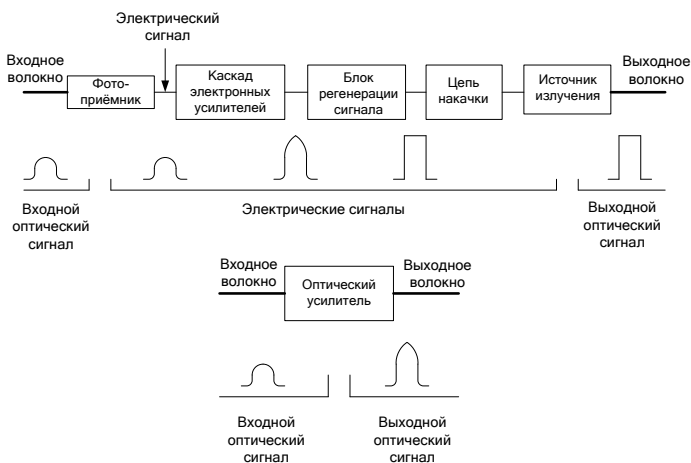


Рисунок 6.17 – Использование регенераторов на ВОЛС

Преобразование в регенераторе цифровых сигналов, распространяющихся по ВОЛС, позволяет использовать их для мониторинга и технического обслуживания линейного тракта.

К недостатку регенераторов следует отнести то, что для питания электрических усилителей в их составе должны быть источники бесперебойного электрического питания. Для этих целей в некоторые типы ВОК приходится вводить одну пару металлических жил для дистанционного питания регенераторов.

6.7.2 Усилители оптических сигналов

Существенное упрощение линейного тракта достигается применением оптических усилителей (см. рисунок 6.17). В отличие от регенератора поступивший на вход усилителя оптический сигнал с аккумулированными линейными искажениями будет усилен и на его выходе появится такой же искаженный сигнал, у которого за счет усиления будет более высокий уровень оптических сигналов и, кроме того, появятся дополнительные искажения за счет добавленных собственных шумов оптического усилителя.

На ВОЛП возможно применение трех типов оптических усилителей (ОУ): на лазерных диодах, на легированном волокне и рамановские усилители. В настоящее время наибольшее применение на практике получили ОУ на волокне, легированные редкоземельными эле-

ментами. Для легирования волокна используется элемент эрбий, а сами ОУ называются усилителем EDFA. Усилители на волокне, легированном эрбием, за последние несколько лет произвели революцию в ВОЛП и телекоммуникационной оптической промышленности, так как обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно. При этом они обладают низким уровнем собственных шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна 1550 нм.

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки (рисунок 6.18).

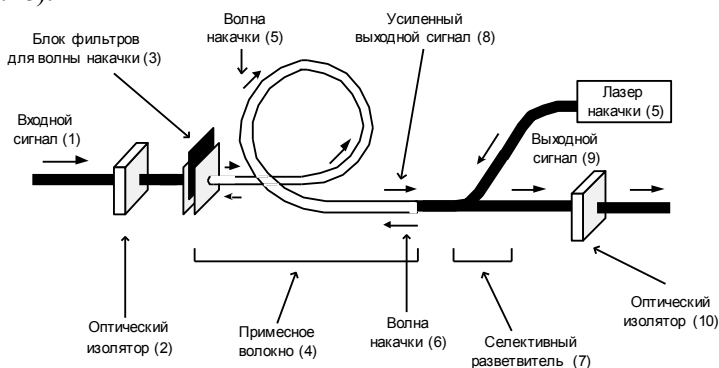


Рисунок 6.18 – Схема оптического усилителя EDFA

Слабый входной оптический сигнал (1) проходит через оптический изолятор (2), который пропускает свет в прямом направлении – слева направо, но не пропускает рассеянный свет в обратном направлении. Далее проходит через блок фильтров (3), которые блокируют световой поток на длине волны накачки, но прозрачны к длине волны сигнала. Затем сигнал попадает в катушку с волокном, легированным эрбием (4). Длина такого участка волокна составляет несколько метров. Этот участок волокна подвергается сильному непрерывному излучению полупроводникового лазера (5), установленного с противоположной стороны, с более короткой длиной волны накачки.

Свет от лазера накачки – волна накачки (6) – возбуждает атомы примесей из возбужденного состояния в основное состояние. Однако при наличии слабого сигнала происходит переход атомов примесей

из возбужденного состояния в основном с излучением света на той же длине волны и с той же самой фазой, что и повлекший это сигнал. Селективный разветвитель (7) перенаправляет усиленный полезный сигнал (8) в выходное волокно (9). Дополнительный оптический изолятор на выходе (10) предотвращает попадание обратно рассеянного сигнала из выходного сегмента в активную область оптического усилителя. Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки. Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем больше требуется мощность накачки. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки. Для накачки оптических усилителей подходят лазеры с длинами волн излучения 980 и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием. Однако при выборе того или иного типа лазеров накачки приходится идти на компромисс. С одной стороны, усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума, чем усилители с лазерами 1480 нм, что лучше для многоканальных систем и предварительных усилителей DWDM. С другой стороны, использование лазеров 1480 нм позволяет создать более мощные усилители меньшей стоимости. Практика показала, что наиболее оптимальный вариант – это осуществить накачку на длине волны 1480 нм в обратном направлении, а накачку на длине волны 980 нм в прямом направлении. Это позволит наилучшим образом использовать преимущества обоих методов, а именно: лазер накачки 1480 нм обладает более высокой квантовой эффективностью, но при этом несколько более высоким коэффициентом шума, в то время для лазера с длиной волны 980 нм можно снизить уровень шума почти до уровня квантовых флуктуаций. Разработка различных схем мощной накачки позволила создать усилители EDFA с расширенным рабочим диапазоном от 1570 до 1605 нм (*L*-диапазон). Такие усилители также называют длинноволновыми усилителями LWEDFA (*Long Wavelength Erbium-Doped Fiber Amplifier*).

На рисунке 6.19 представлена зависимость коэффициента усиления оптического усилителя от длины волны. В простейших конструкциях EDFA усиление происходит в достаточно узком диапазоне

длин волн от 1525 до 1565 нм. В эти 40 нанометров умещается несколько десятков каналов.

В спектральном распределении коэффициента усиления оптического усилителя имеется широкий максимум на длине волны 1535 нм и относительно ровная область между 1540 и 1560 нм. Эта область шириной около 20 нм и является рабочим диапазоном усилителя EDFA, в пределах которого должны лежать длины волн всех каналов систем DWDM. Именно благодаря появлению оптических усилителей сети на основе систем волнового уплотнения стали экономически и технически более привлекательными.

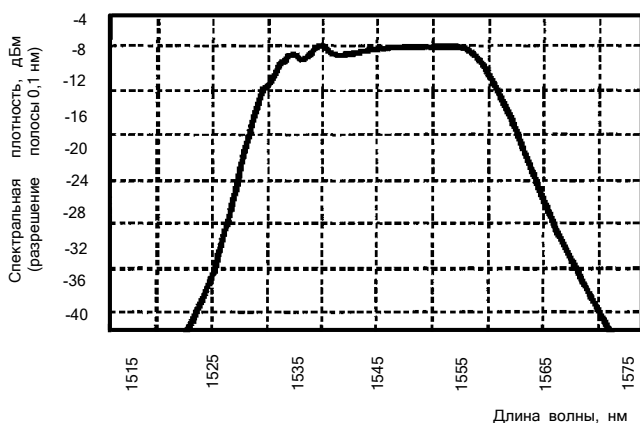


Рисунок 6.19 – Зависимость коэффициента усиления оптического усилителя от длины волны

Коэффициент усиления оптического усилителя EDFA зависит от длины волны и мощности входного сигнала. Зависимость от длины волны определяется формой энергетических уровней легированных атомов эрбия, их концентрацией, распределением, длиной волны лазера накачки и многими другими параметрами и имеет достаточно сложную форму. На рисунке 6.20 приведены типичные зависимости коэффициента усиления от длины волны для трех фиксированных значений мощности.

Более простой вид (вид монотонно убывающей функции) имеет зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала. Такая зависимость для длины волны 1550 нм и мощности насыщения, равной 0 дБм, приведена на рисунке 6.21.

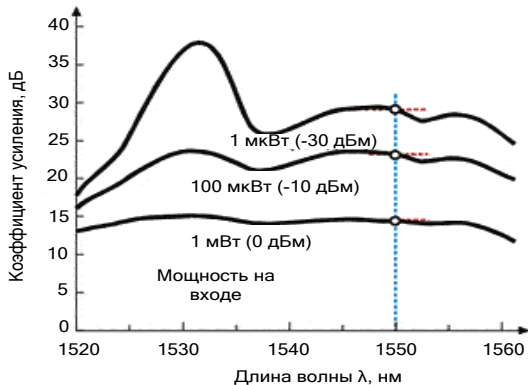


Рисунок 6.20 – Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны входного сигнала

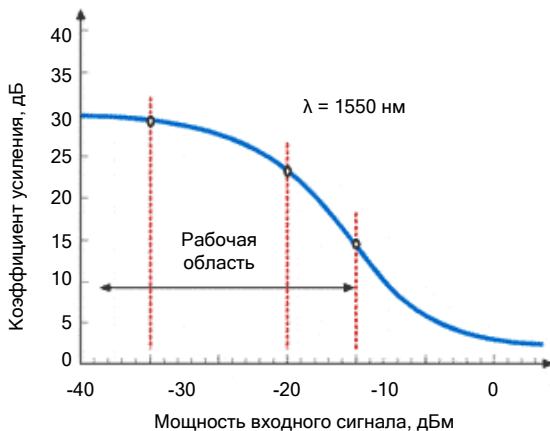


Рисунок 6.21 – Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала при фиксированном значении длины волны 1550 нм

В отличие от электронных регенераторов (повторителей) оптические усилители полностью «прозрачны» – не зависят от используемых протоколов, форматов, скорости передачи и длины волны (в пределах указанных выше ограничений) оптического сигнала (рисунок 6.22).



Рисунок 6.22 – Использование оптических усилителей EDFA

В зависимости от применения различают предварительные усилители, линейные усилители и усилители мощности (рисунок 6.23).

Предварительные усилители (предусилители) устанавливаются непосредственно перед приемником регенератора и способствуют увеличению отношения сигнал/шум на выходе электронного каскада усиления в оптоэлектронном приемнике. Оптические предусилители часто используются в качестве замены сложных и обычно дорогих когерентных оптических приемников.

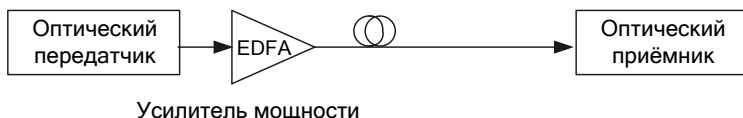
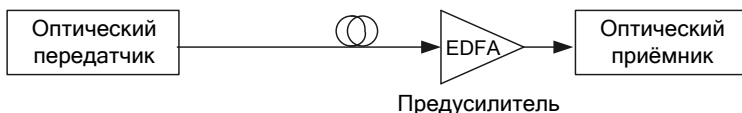


Рисунок 6.23 – Применение разных типов оптических усилителей

Линейные усилители устанавливаются в промежуточных точках протяженных линий связи между регенераторами или на выходе оптических разветвителей с целью компенсации ослабления сигнала, которое происходит из-за затухания в оптическом волокне или из-за разветвления в оптических разветвителях, ответвителях, мультиплексорах WDM. Линейные усилители заменяют оптоэлектронные повторители и регенераторы в тех случаях, когда нет необходимости в точном восстановлении сигнала.

Усилители мощности (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков и предназначены для дополнитель-

ного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем, например, при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных архитектурах кабельного телевидения.

Сравнение параметров рассмотренных усилителей приведено в таблице 6.7.

Для того чтобы подвести итог всему вышесказанному, обратимся к сравнительной таблице 6.8 регенераторов и оптических усилителей. Из характеристик, приведенных в таблице видно, что простота – один из основных факторов оптических усилителей.

Таблица 6.7 – Сравнительный анализ оптических усилителей EDFA

| Параметр | Предусилитель | Линейный усилитель | Усилитель мощности |
|--------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Коэффициент усиления G | Высокий | Средний | Низкий |
| Коэффициент шума | Низкий | Средний | Низкий |
| Мощность насыщения | Низкая | Средняя | Высокая |
| Нелинейность | Низкая | Низкая | Низкая |
| Зона усиления | Узкая | Широкая | Широкая |
| Отклонение от плато ΔG | Не указывается | Высокая линейность | Высокая линейность |

Простота конструкции, в которой преобладают пассивные компоненты, в конечном счете, обеспечивает низкую цену, так как число компонентов в оптических усилителях значительно меньше, чем у регенератора. Оптический усилитель имеет более высокую надежность, чем регенератор. Это очень важное преимущество при строительстве протяженных магистральных цифровых сетей и при прокладке подводного волоконно-оптического кабеля. Оптический усилитель не привязан к скорости передачи информации, в то время как регенератор обычно используется для работы на определенной скорости. Регенератор работает с одним сигналом. Оптический усилитель может одновременно усиливать множество оптических сигналов, представленных несколькими длинами волн (DWDM сигнал) в пределах определенного интервала, называемого зоной усиления. Это позволяет наращивать пропускную способность линии связи с оптическими усилителями EDFA без дополнительной прокладки волоконно-оптического кабеля.

Таблица 6.8 – Сравнительная таблица регенераторов и оптических усилителей

| Характеристика | Регенератор | Оптический усилитель |
|--|-----------------|----------------------|
| Конструкция | Сложная | Простая |
| Цена | Низкая | Высокая, но падает |
| Надёжность | Высокая | Очень высокая |
| Регенерация сигнала | Производится | Исключена |
| Привязка к скорости передачи | Требуется | Не требуется |
| Одновременная передача нескольких сигналов | Не допускается | Допускается |
| Рабочая длина волны, нм | 1550, 1310, 850 | 1550–1565 |
| Отношение сигнал/шум | Высокое | Низкое |

Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам ATM или компонентам протокола IP, при этом не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость – одно из основных преимуществ использования их в системах DWDM.

Цифровые сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности в телекоммуникационных услугах. Применение оптических усилителей позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного пользователя) точках сети.

Каждая линия связи уровня STM-N ($N = 16, 64, 256$) обрабатывается в системе DWDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем DWDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем DWDM в эксплуатацию достаточно низка.

Контрольные вопросы

- 1 Уровни иерархии PDH/ПЦИ.
- 2 Уровни иерархии SDH/СЦИ.
- 3 Основные отличия технологий PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ.
- 4 Особенности технологии ATM.
- 5 Особенности технологии IP.
- 6 Принципы волнового мультиплексирования.
- 7 Диапазоны длин волн для одномодового оптического волокна.

7 ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

7.1 Устройства соединения элементов ВОЛП

Под элементной базой ВОЛП подразумевается комплекс активных и пассивных элементов схем, коммутационных, установочных, монтажных и других компонентов, необходимых для реализации функциональных узлов аппаратуры.

Основной элементной базой активных элементов ВОЛП в настоящее время являются интегральные электрические и оптические (фотонные) микросхемы различного назначения.

К пассивным оптическим элементам относятся следующие устройства:

- соединители сигналов;
- разветвители сигнала, расщепители сигнала (сплиттеры);
- оптические изоляторы;
- волоконно-оптические фильтры;
- делители (аттенюаторы) напряжения;
- коммутаторы (пассивные);
- компенсаторы (выравниватели) хроматической дисперсии;
- оконечные элементы (терминаторы).

Оптический соединитель (оптический разъем) представляет собой устройство для осуществления частых соединений/разъединений оптических волокон или кабелей ВОЛП.

Оптический разветвитель (сплиттер – комбайнер) применяется при построении ВОСП различного назначения, а также при распределении мощности между элементами аппаратуры (оптическая обратная связь, контроль и измерение параметров передачи и др.).

Оптический изолятор – устройство, предназначенное для подавления обратного отраженного сигнала. Оптические сигналы, распространяясь по ОВ, многократно отражаются от различных неоднородностей, главным образом, от оптических соединителей. Оптический изолятор вносит минимальное затухание для сигнала, распространяющегося в прямом направлении, и большое – обратного сигнала рассеивания.

Оптический делитель (аттенюатор) предназначен для уменьшения мощности оптического сигнала. Поэтому они часто называются

регуляторами уровня сигнала. Необходимое изменение (ослабление) уровня оптического сигнала достигается за счет воздушного зазора между торцами соединяемых волокон.

Оптический переключатель (коммутатор) позволяет осуществлять коммутацию оптических сигналов, переходящих из одних ОВ в другие, без которых невозможно изменение конфигурации и оперативное управление резервом ВОЛП.

Оконечный элемент (терминатор) используется в качестве оконечной нагрузки оптоволокну с целью подавления отраженного сигнала.

Пассивный компенсатор дисперсии используется для компенсации хроматической дисперсии ОВ.

Сращивание ОВ осуществляется для соединений двух оптических волокон на трассе ВОЛП. На практике находят применение:

- сварные соединения (сращивания), при которых концы ОВ соединяются в постоянное соединение с помощью сварки;
- механические соединения, при которых концы ОВ соединяются с помощью специальных разъемов или других механических устройств.

7.2 Аппаратура цифровых систем передачи

7.2.1 Источники оптического излучения

Основой оптического передатчика является генератор когерентного или некогерентного излучения. Генераторами когерентного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ) – лазеры. В зависимости от агрегатного состояния активного вещества ОКГ подразделяются на газовые, жидкостные, твердотельные полупроводниковые. В первых системах оптической связи, работающие через атмосферу Земли, использовались, как правило, газовые (гелий-неоновые, смесь углекислого газа) ОКГ. Они позволяли получать относительно большие мощности излучения в непрерывном режиме работы, имели широкий диапазон волн излучения, высокую стабильность частоты и др. Однако они громоздки, срок службы газовых ОКГ небольшой, по мере работы падает мощность излучения, их КПД составляет примерно 0,1 %.

В оптических системах, работающих по ВОК, применяются полупроводниковые ОКГ, которые изготавливаются из GaAs с *p-n*-

переходом. В таких ОКГ энергия постоянного тока непосредственно преобразуется в когерентное световое излучение. Благодаря этому их КПД может достигать 70–80 %. Кроме того, они имеют малые габариты и массу. Полупроводниковый ОКГ при одномодовом режиме работы может излучать мощность около 10 мВт, многомодовый – 50 мВт. Потребляемая мощность составляет 0,2–0,5 Вт.

В многомодовом ОКГ, или лазере с резонаторами Фабри–Перо, излучается несколько мод (рисунок 7.1). В его спектре излучения имеется основная мода требуемой длины волны и боковые моды меньшей амплитуды, отделенные промежутками шириной примерно в 1 нм. Полная ширина спектра оптического излучения такого ОКГ на уровне половины от максимума при модуляции составляет 4–5 нм.

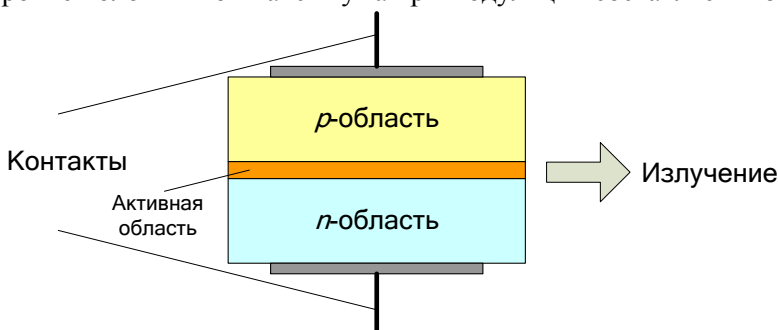


Рисунок 7.1 – Лазер с резонаторами Фабри–Перо

В качестве некогерентного источника применяют также люминесцентные и суперлюминесцентные светоизлучающие диоды (СИД) – светодиоды, как правило, работающие в инфракрасной области. Люминесцентный светодиод представляет собой полупроводниковый p - n -переход, выполненный на основе GaAs и поляризованный в пропускном направлении. Они недороги, по сравнению с большинством ОКГ. Основным их недостатком являлось то, что они имели широкую диаграмму излучения света. Излучаемый свет некогерентен, имеют достаточно широкий спектр (30–60 нм). Первоначально СИДы использовались с многомодовыми волокнами, имеющими большую числовую апертуру.

7.2.2 Оптические модуляторы

В оптическом диапазоне различают внутреннюю и внешнюю модуляцию. При внутренней модуляции производится управление са-

мим источником излучения, например, процессом генерации ОКГ (рисунок 7.2, а). При внешней модуляции происходит воздействие непосредственно на излучение на выходе ОКГ, т. е. оптический модулятор (рисунок 7.2, б). Оптические модуляторы являются интегральными устройствами и предназначены для управления уровнем непрерывной оптической мощности ОКГ. Они работают как полупроводниковые ключи; ключ закрыт для двоичного символа «0» и открыт для двоичного символа «1».

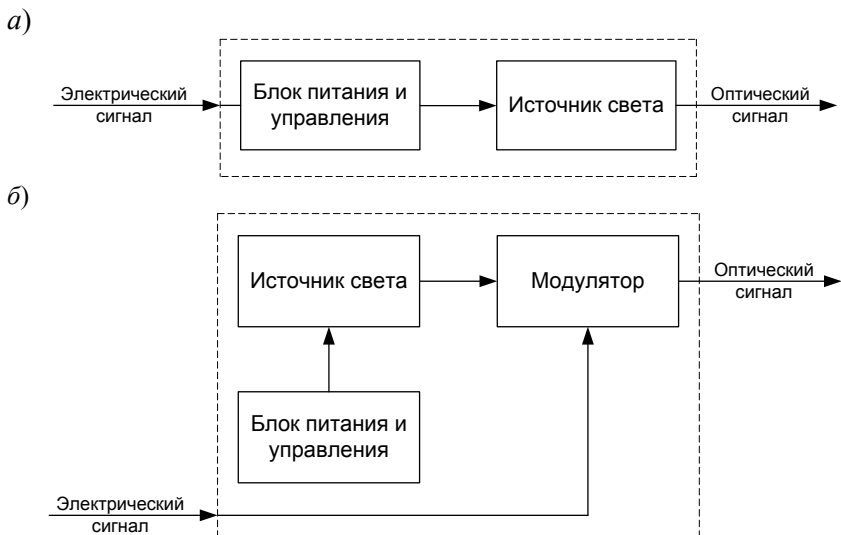


Рисунок 7.2 – Схемы оптических передатчиков:
 а – с прямой модуляцией; б – с внешней модуляцией

7.2.3 Приемники оптического излучения

В ВОЛП в качестве приемников оптического излучения – фотоприемников используются полупроводниковые $p-i-n$ и лавинные фотодиоды. Существуют несколько типов $p-i-n$ диодов, которые могут быть использованы в качестве приемников света в ВОЛП. Однако наибольшее применение получили диоды, работающие в диапазоне коротких (850 нм) и длинных (1310 и 1550 нм) длин волн.

Лавинный фотодиод представляет из себя $p-i-n$ -диод с усилением. Усиление кремниевых лавинных диодов, порядка 20 дБ и для герма-

ниевых – 10–40 дБ. Изготавливаются лавинные фотодиоды на диапазон волн, находящихся в области 300–1700 нм.

7.2.4 Волоконно-оптические фильтры

К наиболее часто применяемым принципам волнового разделения каналов относятся тонкоплёночные фильтры, волоконные брэгговские и дифракционные решетки.

Тонкоплёночный фильтр состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового пучка отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Надлежащим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, который будет пропускать любой заданный диапазон длин волн и отражать все остальные (рисунок 7.3).

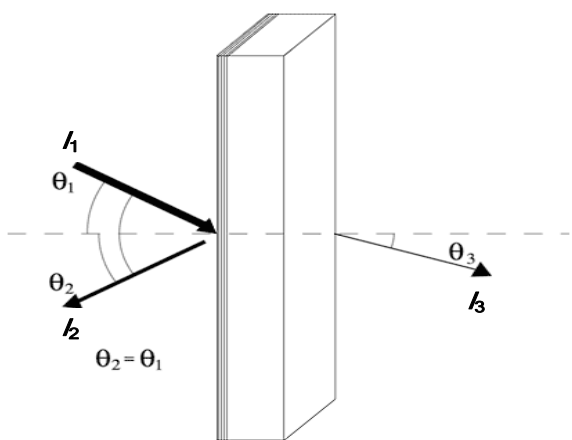


Рисунок 7.3 – Тонкоплёночный фильтр:
 I_1 – падающая волна; I_2 – отраженная; I_3 – прошедшая

Методы выбора параметров и техника нанесения диэлектрических слоев хорошо известны в оптической промышленности десятки лет. Выбор диэлектрических материалов ограничен, так как многие мате-

риалы с хорошими оптическими свойствами имеют физические качества, далекие от требуемых. В общем случае, чем жестче требования к фильтру, тем большее число слоев необходимо нанести на подложку. Несмотря на имеющиеся сложности, эта технология позволяет, незнательно изменяя процесс производства, создавать недорогие фильтры с различными специальными спектральными свойствами.

В мультиплексорах и демультиплексорах используются обычно одноступенчатые тонкопленочные фильтры, каждый из которых выделяет из составного сигнала (или добавляет в него) один канал. Фильтры расположены под наклоном к оптической оси, чтобы отраженный свет не попал обратно в систему. Наклонное расположение фильтров изменяет эффективную толщину слоев и меняет таким образом полосу пропускания, что необходимо учитывать при проектировании фильтров. Для обработки многоволновых сигналов используют многоступенчатые системы фильтров, в которых свет, отраженный от каждого фильтра, попадает на вход следующего фильтра, что придает исключительную важность вопросу их выравнивания (рисунок 7.4).

Тонкопленочные фильтры имеют достаточно узкую полосу пропускания и используются в системах WDM с 16 или 32 каналами. В современных системах с более плотным расположением каналов используют другие технологии.

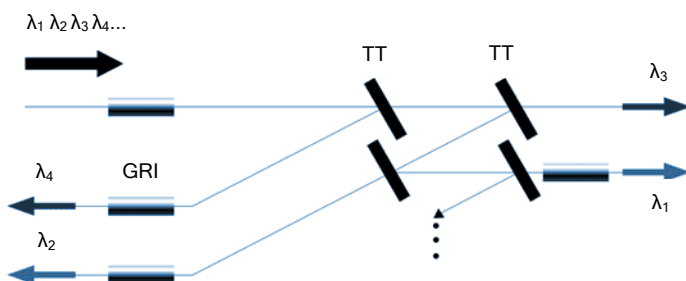


Рисунок 7.4 – Многоступенчатая система тонкопленочных фильтров для демультиплексирования составного сигнала

Волоконная брэгговская решетка (рисунок 7.5) – это, по сути, оптический интерферометр, встроенный в волокно. Волокно, легированное некоторыми веществами (обычно германием), может изме-

нять свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света. Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку. Это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.

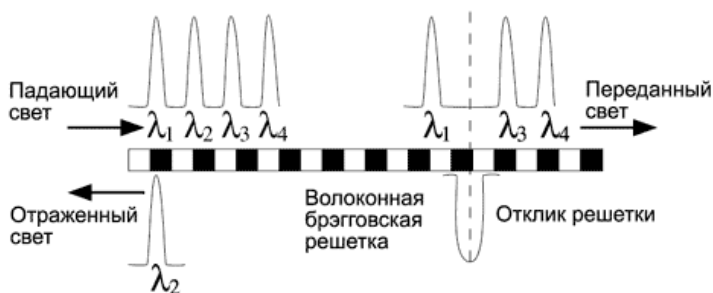


Рисунок 7.5 – Выделение волоконной брэгговской решеткой канала определенной длины волны из составного сигнала

Если структура не вполне периодическая, и период модуляции ее показателя преломления изменяется монотонно (происходит чирпирование), то получается дифракционная решетка с линейно изменяющимся периодом. Такие решетки используются для компенсации хроматической дисперсии в волоконной линии связи или для коррекции чирпированного сигнала лазерного источника.

В мультиплексорах ввода/вывода каналов волоконная брэгговская решетка может использоваться вместе с двумя циркуляторами, редко используются в пассивных компонентах систем DWDM сами по себе. Со стороны порта вывода канала циркулятор выделяет отраженную волну и направляет ее в порт вывода (рисунок 7.6, слева). Со стороны порта ввода циркулятор добавляет в передаваемый составной сигнал один канал на той же длине волны, что была выделена (рисунок 7.6, справа). Такие устройства часто используются на границе между магистральным каналом и сетью городского или регионального масштаба. В магистральном канале обычно очень много

длин волн, в то время как в городских или региональных сетях их намного меньше.

Наряду с мультиплексорами и демультиплексорами, рассмотренная технология узкополосной фильтрации оптических каналов также используется для выравнивания спектра сигнала перед усилителями EDFA, для стабилизации длины волны и в волновых стабилизаторах.

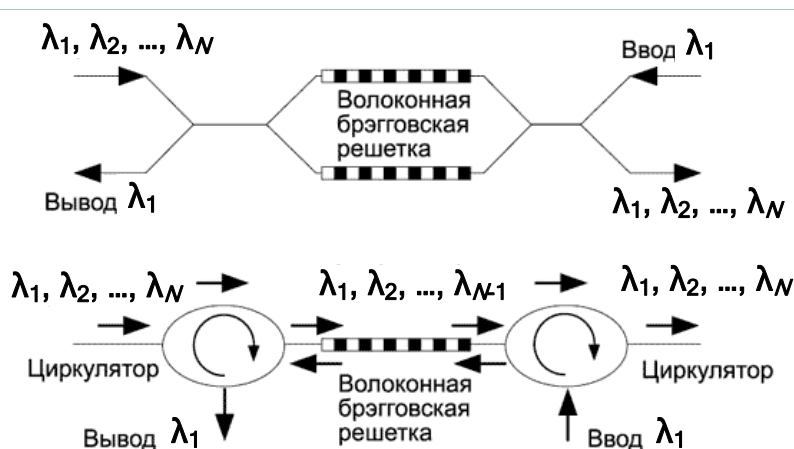


Рисунок 7.6 – Использование волоконных брэгговских решеток в мультиплексорах ввода/вывода каналов

Наиболее распространенные в оптике обычные дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения, причем угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волн. В дифракционных решетках используется тот же физический принцип, что и в тонкопленочных фильтрах – подавление или усиление света за счет интерференции падающих и отраженных волн (рисунок 7.7).

В падающем свете присутствует излучение разных длин волн. Можно выбрать угол падения таким образом, что волны определенной длины при отражении от отдельных линий решетки будут отличаться по фазе друг от друга ровно на одну длину волны. В этом случае все отраженные волны будут усиливать друг друга. Такой угол

будет углом максимального пропускания для заданной длины волны падающего света.

В устройствах мультиплексирования и демultipлексирования дифракционные решетки располагаются на пути света таким образом, чтобы сигнал нужной длины волны мог быть выделен из составного сигнала или добавлен в него. Хотя устройства на основе дифракционных решеток дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери практически не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов. Однако при этом требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.



Рисунок 7.7 – Отражение составного сигнала дифракционной решеткой

Контрольные вопросы

- 1 Основные компоненты оконечного оборудования.
- 2 Основные компоненты линейного цифрового тракта.
- 3 Основные отличия оптических усилителей и регенераторов.
- 4 Способы соединения ВОК и аппаратуры.

8 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ СВЯЗИ

8.1 Общие сведения

Сеть связи железнодорожного транспорта является ведомственной (корпоративной) сетью и представляет собой совокупность первичных и вторичных сетей связи, систем передачи и коммутации, расположенных и функционирующих на железных дорогах. Кроме того, для обеспечения заданных показателей качественного и устойчивого функционирования сети связи железнодорожного транспорта при условии минимизации эксплуатационных затрат ее дополняют рядом других технологических систем, к которым относятся системы управления сетью, технической эксплуатации и метрологического обеспечения, тактовой сетевой синхронизации, служебной связи и т. п. В общем виде архитектура аналоговой сети связи железнодорожного транспорта представлена на рисунке 8.1.



Рисунок 8.1 – Архитектура сети связи железной дороги

Узлы связи (сетевые узлы) располагаются в отделениях железных дорог (НОД) и крупных железнодорожных станциях. Он включает в

себя комплекс технических средств, выполняющих функции организации каналов и трактов первичной сети связи. Между собой УС соединяются пучками и трактами каналов связи, а с ОП – соединительными (абонентскими) линиями или каналами.

В УС размещаются комплекс технических средств, который в зависимости от назначения узла может обеспечивать: организацию и транзит типовых каналов ТЧ и групповых трактов передачи, переключения в процессе управления сеть групповых типовых трактов передачи и каналов и др.

Оконечные пункты оснащаются многоканальными оконечными системами передачи, которые осуществляют преобразование поступающих сообщений в сигналы (электрические, оптические) для передачи по каналам и трактам передачи.

Оконечные станции систем передачи осуществляют также преобразование сигналов в сигналы, удобные для передачи по линиям связи и связаны с узлами связи.

Сети связи подразделяются на первичные (транспортные) и вторичные. Первичная сеть представляет собой совокупность УС и линий передачи, образующую сеть типовых каналов и трактов передачи. Для образования первичной сети связи применяются кабельные, радиорелейные, спутниковые и другие линии связи. Первичная сеть связи служит основой для создания вторичных каналов связи.

Первичная сеть является основой для создания вторичных сетей связи, которые представляют совокупность каналов первичной сети, систем коммутации каналов или пакетов сообщений и их устройств, размещаемых в узлах связи, а также оконечного (терминального) оборудования, устанавливаемого, как правило, в местах пользования услугами связи, т. е. у абонентов сети.

По такому принципу проектируются и строятся вторичные сети телефонной и телеграфной связи, передачи данных, телемеханики и других видов связи.

Повышенные требования к качественным показателям сетей связи железных дорог предопределили также процесс ускорения поэтапной замены ВЛС на магистральных, дорожных и местных сетях связи на КЛС. В первую очередь такую замену производили на участках железных дорог, электрифицируемых по системе переменного тока с одновременным проведением необходимых организационно-технических мер защиты кабеля, аппаратуры и эксплуатационного

персонала от опасного и мешающего воздействия тягового переменного тока высокого напряжения.

8.2 Системные аспекты создания цифровых сетей связи

В соответствии с программой развития телекоммуникаций на БЖД и внедрения на их основе информационных технологий осуществляется выбор предоставляемых услуг связи, а также системы управления сетью и ее технической эксплуатации. При этом, ДЦСС должна быть гибкой, масштабируемой и экономически эффективной, а технические решения, используемые при построении сети, должны использовать международные интерфейсы, обеспечивать надежное ее функционирование, высокое качество обслуживания абонентов и взаимодействовать с существующей АСС. И, наконец, архитектура сети должна быть «неуязвимой» для будущего, т.е. её гибкость должна обеспечить требуемый рост ёмкости и пропускной способности сети без привлечения крупных капиталовложений.

Отсюда следует, что важнейшей задачей при создании ВОЛС железной дороги является выбор современных архитектурных и технологических решений для создания телекоммуникационной инфраструктуры ДЦСС, которая удовлетворяла бы существующим и перспективным (на ближайшие 25 лет) потребностям железной дороги в услугах связи. Архитектура сети должна быть «неуязвимой» при развитии в будущем, то есть она должна быть настолько гибкой, чтобы позволять наращивать свою емкость и изменять технические характеристики без применения глобальных капиталовложений. Поэтому сеть должна быть спроектирована и построена по модульному принципу на основе интерфейсов, соответствующих международным стандартам, что и позволит обеспечить гибкость, масштабируемость и экономичность сети.

На основании изложенного архитектура цифровой сети связи в общем виде может быть представлена: первичной цифровой коммутационной сетью; сетью доступа и предоставления услуг пользователям технологического и коммерческого сегментов (рисунок 8.2).

Технические решения, используемые для построения сети, должны обеспечивать высокое качество обслуживания и снизить до минимума количество возможных перерывов в предоставлении услуг пользователям сети.



Рисунок 8.2 – Архитектура цифровой сети связи: ОТС – оперативно-технологическая связь; ОбТС – общеслужебная телефонная связь; СПД – сеть передачи данных

Первичная сеть реализуется в виде волоконно-оптической сети на основе технологии SDH/СЦИ. Основу первичной транспортной цифровой сети составляют: ВОК, кабельные сооружения, каналообразующее оборудование синхронной цифровой иерархии, система контроля и управления первичной сетью.

В перспективе, когда технология SDH/СЦИ исчерпает возможности оптического волокна по пропускной способности, основу первичной транспортной сети составит технология мультиплексирования по длине волны WDM. Это позволит получить более высокую пропускную способность сети без прокладки дополнительного волоконно-оптического кабеля.

Дорожная цифровая сеть связи представляет собой широкополосную цифровую сеть, которая позволяет создать универсальную транспортную среду с поддержкой различного вида трафика, и предоставить пользователям услуги связи с требуемыми качественными показателями.

ДЦСС использует в качестве первичной сети дорожную цифровую сеть (SDH/СЦИ, WDM) и включает основные элементы: магистральную АТМ-сеть; магистральную (междугородную) сеть обще-

канальной сигнализации № 7 (ОКС-7); наложенную сеть Интернет (IP); сеть доступа.

Предлагаемая концепция построения ДЦСС позволит создать универсальную телекоммуникационную сеть, обеспечивающую:

- интегрированную передачу различного вида трафика (данные, речь, видеоинформация);
- предоставление каналов с гарантированным временем передачи трафика и услуг заданного качества как на местном, так и на междугородном и международном уровнях, с возможностью доведения цифровых каналов непосредственно до пользователей, включая специальных потребителей;
- предоставление услуг интеллектуальной сети;
- различные взаимозаменяемые интерфейсы абонентов, позволяющие простой заменой интерфейсных модулей в устройствах доступа оперативно адаптировать сеть к потребностям пользователей.

При разработке ДЦСС особое внимание должно быть уделено следующим факторам: возможности поэтапного создания сети; сохранению инвестиций; масштабируемости; надежности; управляемости; адаптируемости к быстрому внедрению новых телекоммуникационных услуг; обеспечению информационной безопасности; использованию современных и в то же время проверенных решений.

Принятые решения по технико-программным средствам архитектуры сети должны обеспечивать возможность использования традиционных и перспективных сетевых технологий. При этом рост количества потребителей услуг сети не будет сопровождаться отказом от использования уже приобретенных технико-программных средств, а обеспечивается их наращиванием.

Осуществимость подобных задач на сетях, построенных на базе железнодорожной инфраструктуры, подтверждается опытом РЖД (ТрансТелеКом) и других стран мира.

8.3 Структура телекоммуникационных сетей связи железных дорог

В процессе совершенствования системы управления железнодорожным транспортом на основе автоматизации технологических процессов, применение для этих целей новых технических средств привело к формированию на железнодорожном транспорте СССР четырехуровневой структуры сети связи МПС в составе магистраль-

ной, дорожной, отделенческой и местной сетей связи, которая наиболее полно отвечает иерархической структуре управления отраслью.

Структура организации первичной сети связи магистрального и дорожного уровней в основном была принята аналогичной структуре магистральной и зоновой сетей связи Взаимоуязвленной сети связи СССР. Поэтому максимальная протяженность линейного тракта магистральной первичной сети железнодорожного транспорта определялась такой же, как и первичная сеть связи Министерства связи России, т. е. 12500 км.

Иерархическая структура сети связи БЖД трехуровневая: дорожная, отделенческая и местная (станционная) (рисунок 8.3).

Дорожная первичная сеть рассматривалась как аналог зоновой сети Министерства связи, однако максимальная длина ее линейного тракта достигала 1500 км, что больше протяженности линейного тракта зоновой связи Министерства связи, которая равна 600 км.

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. При этом средняя длина линейного тракта отделенческой первичной сети была принята равной 500 км. По отделенческой сети организуют связь в пределах отделения дороги, и она включает в себя все оконечные и промежуточные железнодорожные станции сети.

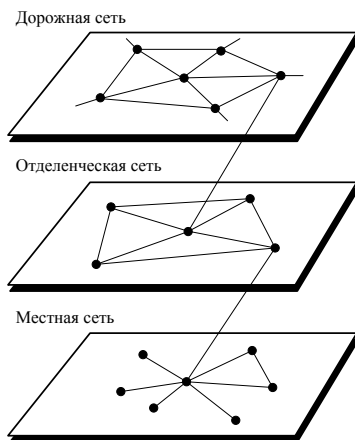


Рисунок 8.3 – Структура первичной сети связи железной дороги

Местную сеть связи организуют в пределах крупных железнодорожных узлов и станций. Протяженность линий местной сети связи, как правило, не превышает 10 км.

Принятая классификация первичной сети связи железных дорог и нормирование для каждого уровня сети соответствующей длины каналов ТЧ и низкой частоты (НЧ) позволяла определить максимальную протяженность каналов связи между абонентами сети, допустимую мощность шума в каналах на каждом уровне сети, а также выбрать (или определить) для каждого уровня первичной сети связи тип линии связи, обеспечивающей выполнение перечисленных требований.

Только на двухкабельных симметричных линиях передачи, спроектированных и построенных в полном соответствии с требованиями технических норм и оборудованных АСП с частотным разделением каналов (ЧРК) типов К-60П, К-24Т и К-3Т, мощность шума в каналах ТЧ максимальной протяженности связи (15520 км) приближается к норме ВСС РФ (соответственно 65400 и 63300 пВт). В этом случае разность соотношений сигнал/шум для каналов ТЧ МПС и ТЧ ВСС РФ составляет 0,1 дБ, что допустимо для сети связи железнодорожного транспорта. Во всех остальных случаях мощность шума в каналах ТЧ значительно превышает норму ВСС РФ, особенно в ТЧ каналах ВЛС и НЧ каналах КЛС первичной сети связи отделенческого уровня.

8.4 Первичная сеть связи

Первичная (транспортная) цифровая сеть связи представляет собой совокупность типовых физических цепей, типовых каналов передачи и сетевых трактов, образованных на базе сетевых узлов, сетевых станций, оконечных устройств и соединяющих их линий передачи.

В качестве среды распространения сигналов в первичных сетях связи могут использоваться кабели с медными жилами и оптическими волокнами, радио и радиорелейные линии, а также спутниковые линии связи. Основными из них являются ВОК с одномодовыми ОВ, на основе которых организуется работа ЦСП синхронной и плезиохронной цифровых иерархий. При использовании кабелей с медными жилами могут применяться ЦСП с РДН/ПЦИ и оборудование семейства xDSL с кодами 2B1Q, CAP, TC-PAM.

Приоритетным направлением должна быть организация цифровой первичной сети связи по высокоскоростным ВОЛП с системами передачи синхронной цифровой иерархии.

Структура первичной цифровой сети связи должна соответствовать административной структуре железнодорожного транспорта и специфике управления грузо- и пассажиропотоками. С другой стороны, первичная сеть связи железной дороги является составной частью телекоммуникационной сети связи Республики Беларусь и должна учитывать ее структуру и возможность их рационального совместного функционирования.

В качестве основных задач развития первичной сети необходимо выделить:

- обеспечение потребности железной дороги в цифровых каналах для развития технологической связи;
- повышение устойчивости работы первичной сети с целью обеспечения надежной связью железной дороги и ее технологических и коммерческих потребителей.

Построение сети связи железнодорожного транспорта определяется не только структурой управления, но и конфигурацией сети отделений дороги, экономично используя преимущества их инфраструктуры. Поэтому одной из основных особенностей построения первичных сетей связи железнодорожного транспорта является то, что по одной и той же ВОЛП, организованной вдоль полотна железной дороги, одновременно организуются все виды дорожных и отделенческих связей в интересах технологического сегмента цифровой сети связи железной дороги, а также все виды связей в интересах предоставления услуг связи сторонним потребителям.

Основу первичной сети составляет транспортный сегмент, который должен являться единым техническим комплексом и обеспечивать пользователям весь спектр современных услуг связи международного, междугородного и местного уровней. Особое внимание должно уделяться решению телекоммуникационных задач, стоящих перед подразделениями, предприятиями и организациями железнодорожного транспорта.

Первичная сеть связи должна быть тесно интегрирована со следующими вторичными сетями:

- оперативно-технологической;
- общетехнологической;
- передачи данных.

В свою очередь, коммерческий сегмент должен обеспечивать полный набор телекоммуникационных услуг, включая: предоставление каналов связи; традиционную телефонию (местную, междугородную и международную телефонную связь); пакетную передачу голоса по IP; передачу данных по IP; передачу данных с гарантией качества; Интернет-доступа; виртуальные АТМ-соединения; традиционные услуги передачи данных (X.25, FR и другие); передачу ТВ/видео; видеоконференции на основе IP.

Помимо поддержки вышеперечисленных услуг, вся инфраструктура сети должна быть легко адаптируемой для внедрения новых услуг в сжатые сроки.

Сеть связи должна обеспечивать высокую надежность и устойчивость при предоставлении услуг, особенно для решения задач управления железной дороги. По этой причине необходимо использование надежного оборудования и применение многоуровневого резервирования.

При этом общим правилом построения дорожной сети является сокращение номенклатуры используемого оборудования при одновременном увеличении его универсальности с точки зрения предоставления услуг. В общем виде уровни иерархии первичной цифровой сети МПС России представлены на рисунке 8.4.

Основной технологической базой для построения дорожной первичной сети должна быть технология SDH/СЦИ. Только технология SDH/СЦИ предлагает требуемую масштабируемость (2–100000 Мбит/с) для сети страны как по зоне покрытия, так и по пропускной способности.

Дорожная сеть, построенная на основе SDH/СЦИ, позволяет создать единую транспортную среду, позволяющую передавать и оперировать стандартными цифровыми потоками информации Е1, Е3, имеющую единую систему управления, и стандартные интерфейсы для подключения. Кроме того, такая транспортная система позволит наилучшим способом организовать применение новых технологий с коммутацией пакетов.

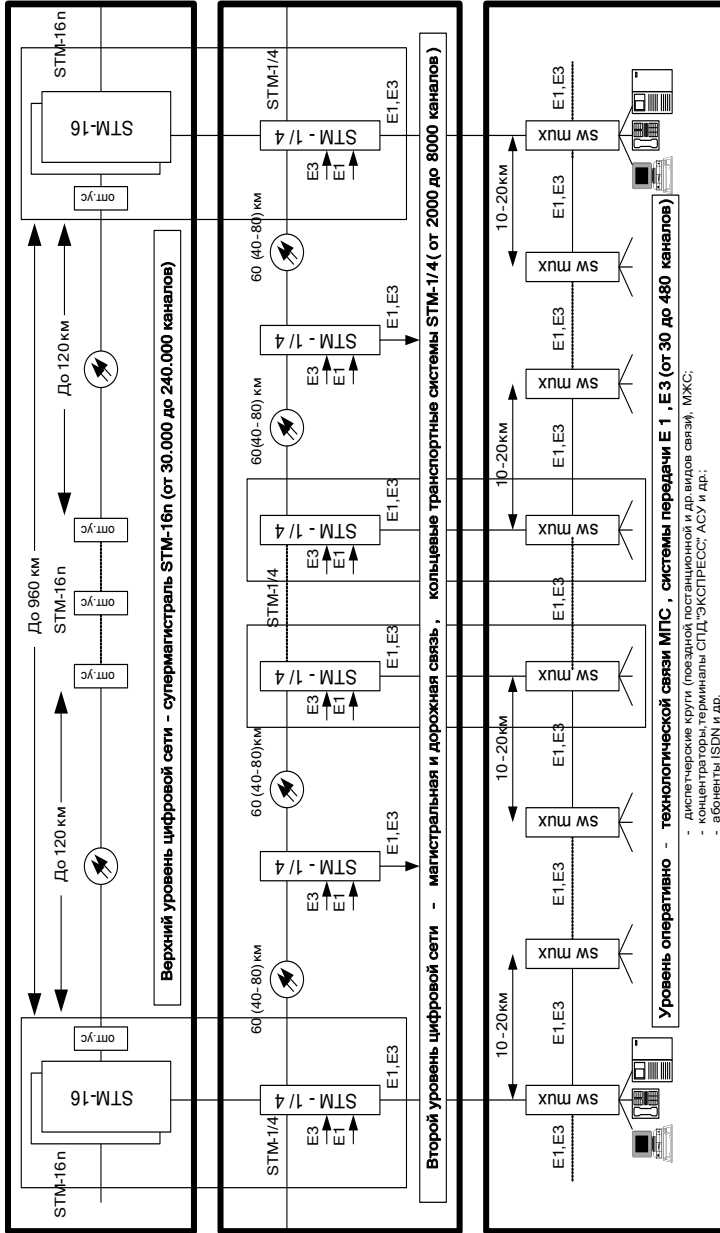


Рисунок 8.4 – Уровни иерархии первичной цифровой сети связи МПС:
опт. ус. – оптический усилитель; E₁, E₃ – цифровые потоки

Транспортная сеть SDH/СЦИ строится с использованием оборудования синхронных транспортных модулей (Synchronous Transport Module) STM-1, STM-4 и STM-16. Оборудование SDH-сети обеспечивает высокую надежность первичной транспортной сети. Все каналы в сети могут быть дублированы за счет объединения ее узлов в кольцевые структуры, что дает возможность системе управления сетью автоматически переключать основной канал на обходной в случае отклонения качественных параметров основного канала от нормы. Переключение происходит без потери передаваемой информации незаметно для пользователя. Такой принцип организации сети позволяет обеспечить резервирование связи в случае аварии на кабельных трассах телефонной сети, разрыва оптического кабеля или выхода из строя различных элементов оборудования сети.

Сеть SDH строится на базе SDH-коммутаторов, способных мультиплексировать стандартные сигналы PDH и SDH до уровня 2,5 Гбит/с (STM-16). Широкий диапазон, высокая пропускная способность и гибкие возможности подключения делают SDH коммутаторы основным элементом при построении эффективных и экономичных магистральных сетей с единой платформой для обеспечения различных выходов STM-1, STM-4, STM-16.

Основой высокой надежности сетей SDH являются: резервирование подключений к подсети и резервирование линий. В составе сетевого элемента должны дублироваться все сменные платы, отвечающие за передачу данных, что позволяет предотвратить потерю данных при отказе оборудования.

Пропускная способность ВОЛП должна определяться с учетом технологических потребностей железной дороги и потребностей коммерческого сегмента, а также некоторых других операторов сетей общего пользования в районе прохождения трассы ВОК.

Модернизация и расширение магистральной сети должна проходить в объемах:

– учитывающих потребности предполагаемого развития сетей оперативной и технологической связи железных дорог для предоставления услуг абонентам в рамках ведомственной сети и организации управления технологическими процессами и эксплуатацией железных дорог (предполагаемая емкость и соответственно тип системы передачи – эквивалент STM-1, с возможной модернизацией до STM-4);

– обеспечения возможностей предоставления магистральной сетью различных услуг абонентам сетей общего пользования и сдачи в аренду ресурсов коммерческого сегмента первичной сети другим операторам сетей электросвязи как ведомственным, так и сетей общего пользования (предполагаемая емкость и соответственно тип системы передачи – эквивалент STM-4/16, с возможной модернизацией до STM-16).

Возможными сетевыми структурами являются кольцевые или узловые сети с поддержкой резервирования на всех типах интерфейсов.

Так как процесс перехода от аналоговой сети к цифровой длительный, дорожная и отделенческая первичная сеть в ближайшее время будет включать в себя существующую аналоговую и цифровую наложенную сети, т. е. аналогово-цифровую сеть связи.

Перспективная цифровая дорожная первичная сеть будет базироваться на дорожных (ДУ) и отделенческих (ОУ) сетевых узлах и станциях, а также на линиях передачи, их соединяющих.

Отделенческая первичная сеть организуется на базе линий передачи, отделенческого сетевого узла, сетевых узлов участковых станций, промежуточных и оконечных станций (УС, ПС, ОС). Очевидно, что дальнейшее развитие дорожной и отделенческой сетей будет осуществляться в трех направлениях:

- количественного и качественного роста сети;
- пропорционального развития первичных и вторичных сетей (по различным железным дорогам РФ);
- расширения номенклатуры типовых каналов и трактов, способствующих увеличению количества услуг, предоставляемых вторичными сетями.

Принципы построения цифровых первичных сетей дорожного и отделенческого уровней определяются требованиями, предъявляемыми к этим сетям в части надежности и живучести. С целью повышения живучести перспективной первичной сети ее развитие должно осуществляться на основе комплексного использования всех проводных и радиосредств, кабелей дальней связи с симметричными медными жилами и волоконно-оптических кабелей, радиорелейных и спутниковых линий передачи, а также различных средств подвижной связи.

Основными средствами цифровизации дорожной и отделенческой сетей по ВОЛП должны быть цифровые системы передачи, обеспе-

чивающие образование следующих цифровых каналов и групповых цифровых трактов:

- основных цифровых каналов 64 кбит/с;
- первичных цифровых каналов и цифровых групповых трактов 2048 кбит/с;
- третичных цифровых каналов и цифровых групповых трактов 34368 кбит/с.

Таким образом, техническое развитие и совершенствование ведомственных средств связи будет осуществляться на основе внедрения на дорожном и отделенческом уровне аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии и использования ресурсов магистрального уровня SDH/СЦИ.

На отделенческой первичной сети, организуемой по ВОК, возможно использование аппаратуры PDH/ПЦИ первого и третьего уровней (2048 кбит/с и 34 Мбит/с).

Количество потоков 2048 кбит/с, выделяемых на станции из оборудования SDH/СЦИ и PDH/ПЦИ и используемых на дорожном и отделенческом уровнях, зависит от числа терминалов местной сети, которым необходим доступ во вторичные сети связи железной дороги.

В соответствии с техническими возможностями систем передачи синхронной и плезиохронной цифровой иерархии на первичных сетях, построенных на ВОК, рекомендуется организовывать кольцевые структуры.

Взаимодействие SDH/СЦИ с PDH/ПЦИ и образование кольцевых структур для резервирования отделенческих связей через аппаратуру дорожного уровня должно осуществляться путем транзита, и наиболее целесообразно на уровне 2 Мбит/с. Сигналы 34 Мбит/с выгодно разделить на потоки по 2 Мбит/с, однако при необходимости возможен и прямой ввод сигналов 34 Мбит/с в оборудование SDH/СЦИ с помощью соответствующего компонентного интерфейса. Образование кольцевых структур для резервирования дорожных связей через аппаратуру магистрального уровня STM-4 должно осуществляться либо через интерфейс – 2 Мбит/с, либо через интерфейс – 34 Мбит/с на уровне VC-12. Схема организации фрагмента цифровой дорожной и отделенческой первичной сети представлена на рисунке 8.4.

На этой схеме представлена трехуровневая система организации первичной сети, включающая магистральный, дорожный и внутридорожный уровни. Транспортный сегмент обеспечивает первичными цифровыми каналами Е1 магистральный и дорожный уровни. Для

организации каналов связи дорожного уровня из транспортной сети выделяется эквивалент потока STM-1, из которого, в зависимости от конфигурации дороги и потребности в каналах связи, выделяются потоки E1 в отделениях дорог, на крупных и промежуточных станциях для сетей ОбТС и ПД на дорожном уровне, резервирование каналов ОТС по кольцевым схемам и подтягивание их в единый диспетчерский центр управления движением поездов (ЕДЦУ).

Внутридорожный уровень первичной сети обеспечивает каналами связи нижний уровень сетей ОТС, ОбТС, ПД и СПД-ЛП технологического сегмента и строится на специализированных системах передачи PDH для сопряжения с существующей аналоговой сетью связи или специализированных системах ОТС, включающих в себя систему передачи и коммутации. Для организации первичной сети технологического сегмента выделяется не менее 4 волокон:

- 2 волокна для систем передачи плезихронной цифровой иерархии PDH (прием, передача);

- 2 волокна для резерва волокон систем передачи технологического сегмента (прием, передача) или для использования на участках с малыми станциями, где целесообразна установка первичного мультиплексора или оптического модема для доступа к системам передачи PDH.

Использование кольцевой структуры обеспечивает надежный резерв отделенческих и дорожных связей через цифровые системы передачи высших иерархий (магистральный уровень).

Помимо ВОЛП в качестве линий передачи планируется использовать существующий симметричный кабель с медными жилами для подключения (по технологии HDSL) абонентов малых железнодорожных станций и остановочных пунктов, где не предусмотрен оптический кросс к сети отделенческой связи, резервирования ПЦК отделенческой первичной сети по технологии HDSL и диспетчерских связей в сети ОТС.

На основе первичной сети организуются все вторичные ведомственные сети связи – ОбТС, ОТС и СПД.

Для функционирования вторичных ведомственных сетей связи необходимы каналы различной структуры: прямые, групповые, многоточечные. Предоставить данные каналы пользователю могут только специализированные системы передачи, выпускаемые ограниченным количеством производителей.

8.5 Вторичные сети связи

8.5.1 Исходные положения

На базе первичной сети связи для всех уровней иерархической структуры управления перевозочного процесса на железных дорогах создаются вторичные сети связи, предназначенные для передачи одного какого-либо вида сообщений требуемых объемов и с заданным качеством передачи (разборчивостью речи, вероятностью ошибки дискретных сигналов, временной их задержкой и др.). Наибольшее распространение на железных дорогах получили вторичные сети оперативно-технологической (ОТС) проводной и радиосвязи, передачи дискретной информации (ПДИ), телефонной связи общеслужебного пользования (СОП) и технологической связи специального назначения. Сети ОТС и специальные предназначены для организации оперативного управления и контроля за исполнением графика движения поездов, своевременной передачей поездов по стыкам железных дорог, передачи сведений о погрузке и выгрузке вагонов и контейнеров, управления другими технологическими процессами. В качестве технических средств для организации ОТС и специальных видов связи технологического назначения (например, связи совещаний, дорожно-распорядительной и т. п.) на отделенческом уровне используются каналы ТЧ и НЧ, аппаратура избирательной телефонной связи, связи совещаний и дорожно-распорядительной связи.

На дорожном уровне указанные виды связи строятся по распорядительному принципу в сторону исполнительного пункта. При этом для связи совещаний применяется 100%-ное резервирование каналов ТЧ, используется специальная аппаратура с возможностью перерыва («перебоя») передачи от исполнительной станции. В системе дорожно-распорядительной связи используется режим типа конференц-связи и избирательный принцип вызова абонентов.

Вторичные сети связи железных дорог в основном являются технологическими и предназначены для управления и организации перевозочного процесса. При этом руководство движением поездов, как правило, осуществляется на уровне отделений дорог. Поэтому далее приведена только сложившаяся структура организации отделенческой сети связи (ОСС) и технические средства для ее реализации, так как именно на этом уровне:

– проявляются основные отличия в построении сети связи МПС от общегосударственной сети;

– несоответствие количественного и качественного состояния первичной ОСС требованиям Правил технической эксплуатации железных дорог (ПТЭ) и электрических норм на каналы и групповые тракты накладывают определенные ограничения на развитие вторичных сетей общеслужебного и специального назначения отделенческого и дорожного уровней.

Структура построения первичной ОСС во многом зависит от технологии работы потребителей услуг связи и, следовательно, от организации вторичных сетей, которые можно рассматривать как совокупность следующих различающихся по виду передаваемой информации, назначению и принципам организации сетей связи: телефонной ОТС; телефонной СОП; ПДИ.

8.5.2 Сеть оперативно-технологической связи

Цифровая сеть ОТС предназначена для передачи сообщений в системах оперативного диспетчерского управления работой железнодорожного транспорта на всех иерархических уровнях и во всех подразделениях с обеспечением прямых (выделенных) и групповых каналов для передачи речевых сигналов, дискретных сообщений, телеуправления и телесигнализации и др. В состав ОТС входят следующие сети: магистральная; дорожная; отделенческая и станционная.

Сети ОТС организуются независимо одна от другой и представляют собой самостоятельные выделенные сети связи и каналы передачи.

Дорожная ОТС предназначена для соединений и ведения служебных переговоров руководства распорядительных отделов железных дорог с абонентами всех служб и подразделений, участвующих в перевозочном процессе.

Отделенческая ОТС предназначена для установления соединений и ведения переговоров диспетчеров всех служб дороги с абонентами диспетчерских кругов (участков), находящихся на станциях, перегонах и других объектах железных дорог.

Сеть доступа и предоставления услуг – уровень, включающий в себя все пограничное оборудование, обеспечивающее предоставление телекоммуникационных услуг абонентам сетей передачи данных

(СПД), общетехнологической (ОбТС) и оперативно-технологической связи, а также абонентам сетей клиентского доступа.

8.5.3 Сеть общетехнологической телефонной связи

Сеть ОбТС предназначена для предоставления работникам различных подразделений железнодорожного транспорта услуг по передаче речевой, документальной информации и видеосообщений в пределах всей сети железных дорог, необходимых для управления перевозочным процессом, а также дополнительных услуг, обеспечиваемых современным телекоммуникационным оборудованием.

Сеть передачи данных – большая ведомственная сеть, состоящая из множества систем, расположенных территориально по всем иерархическим уровням управления.

Сеть абонентского доступа (клиента) включает участок от абонента до АТС любого типа. Как правило, она организуется на кабелях городского типа с медными жилами диаметром 0,50 и 0,64 мм. Конструкция кабелей должна обеспечивать их прокладку в телефонной канализации, грунте и подвеску на опорах воздушных линий связи, а также обеспечивать функционирование оконечного оборудования технологии xDSL, работающего по линии с кодами HDB-3, 2B1Q, CAP, TC-PAM в диапазоне частот до 2048 кГц.

Контрольные вопросы

- 1 Архитектура цифровой сети связи железной дороги.
- 2 Структура первичной сети связи железной дороги.
- 3 Первичная и вторичные сети связи, их особенности.

9 СИСТЕМА ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

9.1 Общие сведения

Синхронизация – это процесс установления и поддержания определенных временных соотношений между двумя и более процессами. В цифровых сетях связи, в которых совместно работают ЦСП и системы коммутации потоков информации, для обеспечения их функционирования на всех уровнях иерархии сети предусмотрена система тактовой синхронизации (ТТС). Причем ТТС должна быть рассчитана на использование как в системах PDH/ПЦИ, так и SDH/СЦИ.

Необходимость в ТСС возникает также, когда цифровые сети интегрируются с цифровыми системами коммутации в единую сеть, способную передавать, принимать и коммутировать сигналы в цифровой форме.

В цифровых сигналах, переданных через спутниковые линии связи и предназначенных для использования в наземной сети SDH/СЦИ, на земной станции (или спутнике) должны быть скомпенсированы также изменения задержки сигнала (эффект Доплера), а вносимое спутниковыми линиями долговременное относительное расхождение частот не должно превышать 10^{-9} .

Процесс синхронизации может обеспечиваться как за счет автономного источника (эталоны времени), так и принудительной синхронизации. В качестве автономного источника обычно используют местный (локальный) генератор с высокой стабильностью частоты. Принудительная синхронизация может основываться на использовании отдельного канала, по которому передаются сигналы, необходимые для изменения в небольших пределах частоты местного генератора, или непосредственно на информационной (рабочей) последовательности принятых сигналов.

Для тактовой синхронизации в сети необходим источник синхронизации – тактовый генератор или таймер для всех узлов связи. Система тактовой синхронизации сети имеет иерархическую структуру. В узлах сети размещают первичный эталонный генератор (ПЭГ) тактовых импульсов (*Primary Reference Clock – PRC*) или первичный таймер, сигналы которого затем распределяются по сети, создавая вторичные источники – ведомые эталонные генераторы (ВЭГ) тактовых импульсов (*Secondary Reference Clock – SRC*), или вторичный таймер, генератор сетевого элемента (ГСЭ) и генераторное оборудование потребителей сигналов синхронизации (БСС) коммутационных станций и задающие генераторы различного оборудования передачи и коммутации данных.

Первичный эталонный генератор обычно представляет собой атомный источник тактовых импульсов (цезиевые или рубидиевые часы) с точностью не менее 10^{-9} – 10^{-11} . Его калибруют вручную или автоматически по сигналам мирового эталона времени UTC (Universal Time Coordinated). Эти сигналы затем распространяются по наземным линиям связи для реализации того или иного метода синхронизации.

На действующих цифровых сетях нестабильность сигналов синхронизации или хронизирующих сигналов возникает по причинам как физическим, из-за изменения параметров линии передачи и внешних электромагнитных помех, так и алгоритмическим, например джиттера стаффинга и смещения указателей.

Таким образом, на сети используется следующая иерархическая структура:

- на первом уровне используется ПЭГ, удовлетворяющий Рекомендации МСЭ-Т.811;

- на втором уровне ВЗГ, удовлетворяющие Рекомендации МСЭ-Т.812, либо генераторы коммутационного оборудования, параметры которых соответствуют Рекомендации МСЭ-Т.823 (02.2000);

- на самом низком уровне – генераторы сетевых элементов, параметры которых также удовлетворяют Рекомендации МСЭ-Т.823 (02.2000).

Дрожание фазы сигналов генераторов, находящихся на всех уровнях, не должны превышать 0,05 единичного интервала (ЕИ), при дрожании на входе 0,5 ЕИ измеренных в полосе частот от 20 Гц до 100 кГц.

На всех стыках системы РДН/ПЦИ дрожания фазы сигнала на выходах и входах не должны превышать 1,5 ЕИ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц и 0,2 ЕИ в диапазоне частот от 18 до 100 кГц. Сетевые стыки генераторов коммутационных станций и мультиплексоров SDH/СЦИ и РДН/ПЦИ должны соответствовать Рекомендациям МСЭ-Т.823 (02.2000).

Ввиду большой географической протяженности большие цифровые сети связи для устойчивой работы синхронизации обычно строятся по региональному принципу – каждый регион синхронизируется от своего ПЭГ. При этом взаимодействие между регионами по синхронизации происходит в псевдосинхронном режиме. Так, МЦСС РЖД по синхронизации разделяется на четыре региона с установкой ПЭГ в Москве, С.-Петербурге, Новосибирске и Хабаровске. Причем количество последовательно включенных ВЗГ в цепи синхронизации от ПЭГ до последней станции местной сети не должно превышать десяти.

ПЭГ должен обеспечить необходимое качество генерируемых и передаваемых в сеть ТТС синхросигналов. Для оценки качества ТСС согласно Рекомендации МСЭ-Т.822 используются три категории

качества: высшая («а»), ухудшенного («в») и недопустимого («с»). Высшая категория соответствует нормальному режиму работы сети, когда в цепи синхронизации отсутствуют неисправности, категория ухудшенного качества – появлению одиночной неисправности в цепи синхронизации и категория недопустимого качества – соответствует работам по монтажу и настройке цепей синхронизации.

Проектная документация ТСС должна содержать схемы синхронизации с указанием:

- мест расположения ПЭГ, ВЗГ, сетевых элементов, подлежащих синхронизации, и дополнительного оборудования синхронизации;
- основного и резервных направлений передачи сигналов синхронизации;
- приоритетов в системе управления синхронизацией;
- видов используемых сигналов синхронизации, уровня их качества и условий их использования.

При составлении и разработке проектной документации ТСС необходимо:

- провести проверку допустимости протяженности линии связи;
- определить взаимосвязь с другими системами ТСС;
- выбрать источники синхросигналов (основной и резервный);
- определить основные и резервные пути прохождения синхросигналов;
- определить качество источников сигналов синхронизации;
- провести структурный анализ сети с целью исключения возможности образования петель и потерь синхронизации при авариях;
- определить потребности в дополнительном оборудовании синхронизации, которое необходимо установить на сети;
- конкретизировать схемы подключения сигналов синхронизации к коммутационным станциям и другим оконечным оборудованьям;
- провести проверку обеспечения сигналами синхронизации каждой коммутационной станции при возникновении любой одиночной неисправности;
- провести расчет устойчивости синхронизации каждой коммутационной станции и разработку рекомендаций по периодической регулировке или замене блоков синхронизации коммутационных станций.

9.2 Источники синхронизации цифровых сетей связи

В качестве источников сигналов синхронизации в цифровых сетях используются первичные эталонные источники (ПЭИ), характеристики которых регламентируются международными рекомендациями. В соответствии с ними для выходных сигналов ПЭИ максимально допустимое относительное отклонение частоты от номинального значения не должно превышать 10^{-11} при всех возможных условиях окружающей среды и времени наблюдения не менее недели.

В качестве ПЭИ обычно используются цезиевые или водородные генераторы, однако эталонные сигналы синхронизации можно получить также с помощью приемников, получающих сигналы спутниковых навигационных систем.

Главным элементом системы тактовой сетевой синхронизации, находящейся на 1-й ступени иерархии, является первичный эталонный генератор, в состав которого входят три ПЭИ и ведомый задающий генератор (ВЗГ). Как показано на рисунке 9.1, аппаратура может быть полностью автономной и использовать только цезиевые или водородные ПЭИ, или комбинированной с использованием радиочастот.

а)

б)

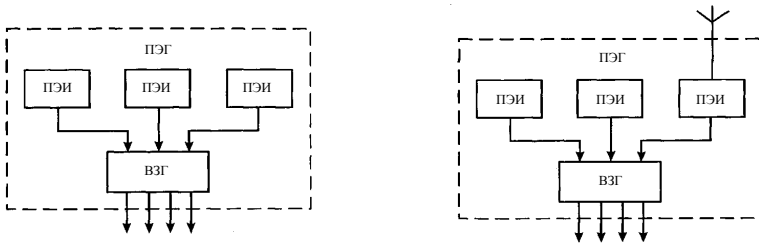


Рисунок 9.1 – Схемы первичного эталонного генератора:

а – автономного; б – с использованием радиочастот

Выходными сигналами ПЭГ являются основные сигналы 2048 кГц и 2048 кбит/с. Характеристики эталонных сигналов всех ПЭИ проверяются контрольными устройствами ВЗГ. В аппаратуре ПЭГ, кроме тройного резервирования ПЭИ, предусмотрено резервирование остального оборудования, входящего в состав ВЗГ. Двойное резервирование может применяться и для выходных интерфейсов ПЭГ. Как правило, аппаратура ПЭГ имеет не менее 16 выходов тактовой частоты. Если этого в конкретном узле окажется мало, ПЭГ

может доукомплектовываться аппаратурой распределения сигнала синхронизации.

На 2-й и 3-й ступенях иерархии системы ТСС находятся ведомые генераторы – транзитные и местные. Их назначение – восстановление и поддержание необходимого качества сигналов синхронизации при распространении по сети. Транзитные ВЗГ имеют более стабильное и, соответственно, дорогое генераторное оборудование, способное обеспечить длительную работу системы ТСС при потере внешнего сигнала синхронизации, а также эффективно подавлять фазовые помехи. Поэтому местные ВЗГ применяются на участках сети, с которых сигналы синхронизации не поступают на другие участки с ВЗГ, так как они не могут обеспечить требуемого качества транзита. Упрощенная функциональная схема ВЗГ представлена на рисунке 9.2.

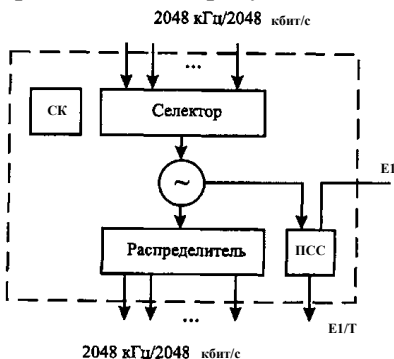


Рисунок 9.2 – Упрощенная функциональная схема ведомого задающего генератора

На селектор поступают не менее двух сигналов 2048 кГц или 2048 кбит/с. Система контроля и управления выбором (СК) анализирует качество сигналов и выбирает наилучший для синхронизации основной генератор (в ВЗГ используются кварцевые генераторы) выходной сигнал, удовлетворяющий рекомендации МСЭ-Т G.812. Он поступает на распределитель, который обеспечивает требуемое число интерфейсов 2048 кГц или 2048 кбит/с. Как правило, в составе ВЗГ имеется преобразователь сигналов синхронизации (ПСС), с помощью которого восстанавливаются исходные характеристики тактовой частоты в информационных сигналах 2048 кбит/с, пришедших на данный узел из линии РДН/ПЦИ или выделенных из систем

SDH/СЦИ. Этот сигнал обозначают как E1/T и его можно использовать далее для синхронизации.

В цифровых сетях связи используют различные варианты включения ВЗГ. На железнодорожном транспорте, где распространены большие цепочки последовательно включенных мультиплексов, ВЗГ наиболее часто используется для восстановления тактовых интервалов. При этом в рекомендациях МСЭ-Т существуют определенные нормы на число последовательно включаемых генераторов сетевых элементов и ВЗГ.

Рекомендуемая эталонная цепь синхронизации сети показана на рисунке 9.3. Здесь сетевые генераторы, удовлетворяющие рекомендации G.812, синхронизируются от ПЭГ через цепочку ГСЭ, входящих в состав мультиплексов SDH/СЦИ ВЗГ.

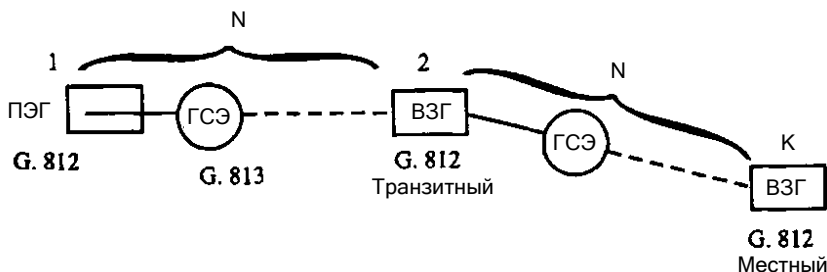


Рисунок 9.3 – Эталонная цепь синхронизации сети связи

В качестве наихудшего случая принимается $K = 10$ и $N = 20$, причем общее число ГСЭ ограничено 60. То есть при максимальном числе последовательно включенных ВЗГ среднее число ГСЭ между ними равно 6. На рисунке 9.4, а показано взаимодействие мультиплексора и ВЗГ на промежуточных узлах, где происходит восстановление тактового сигнала. На ВЗГ через мультиплексор поступает тактовый сигнал, выделенный из линии, а генератор мультиплексора ГСЭ синхронизируется от восстановленного сигнала. Вторым вариантом включения является использование ВЗГ в качестве резервного сетевого генератора (рисунок 9.4, б). При потере сигнала ПЭГ промежуточный мультиплексор переключается на тактовый сигнал от ВЗГ и распространяет его в обе стороны по линии передачи до восстановления эталонного сигнала. Третий вариант – это включение

ВЗГ для синхронизации крупного узла связи или нижнего уровня цифровой сети (рисунок 9.4, в). Обычно для этой цели устанавливают ВЗГ местного уровня.

ВЗГ несут очень важную функцию в системе ТСС. Иногда (а в последнее время все чаще) для обеспечения более качественного и надежного резервирования эталонных сигналов к ВЗГ дополнительно подключают ПЭИ.

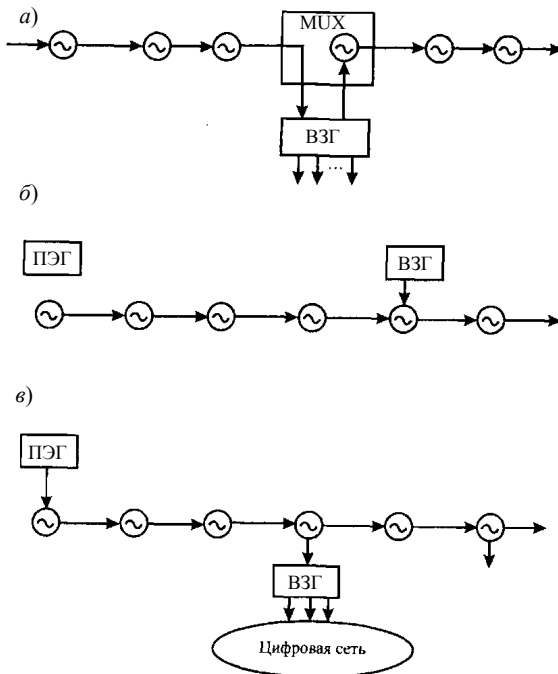


Рисунок 9.4 – Варианты взаимодействия мультиплексора и ведомого задающего генератора на промежуточных узлах

По мере развития цифровых сетей в узлах и на промежуточных станциях устанавливается все больше аппаратуры, требующей принудительной тактовой синхронизации. Как известно, аппаратура на крупных узлах сети должна получать сигналы синхронизации по топологии «звезда» непосредственно от ПЭГ или ВЗГ, установленного на данном узле. На небольших узлах и промежуточных пунктах с выделением каналов и трактов сигналы синхронизации поступают от мультиплексоров SDH/СЦИ, получающих сигнал со стороны ПЭГ

или ближайшего ВЗГ. Однако большинство мультиплексоров SDH/СЦИ имеют не более двух выходов сигналов тактовой синхронизации, что в ряде случаев оказывается недостаточным для обеспечения тактовыми сигналами аппаратуры, установленной на данном пункте. Так, например, на промежуточных станциях железнодорожной сети связи помимо мультиплексоров SDH/СЦИ, получающих сигнал синхронизации по линейному сигналу STM-N, необходимо синхронизировать мультиплексоры доступа, цифровые АТС, аппаратуру цифровой оперативно-технологической связи. В этом случае рекомендуется использование аппаратуры распределения сигналов синхронизации (АРСС).

АРСС состоит из устройства выбора сигнала синхронизации и формирователя выходных сигналов (рисунок 9.5). Так же, как и в ВЗГ, в состав АРСС может входить устройство ПСС.

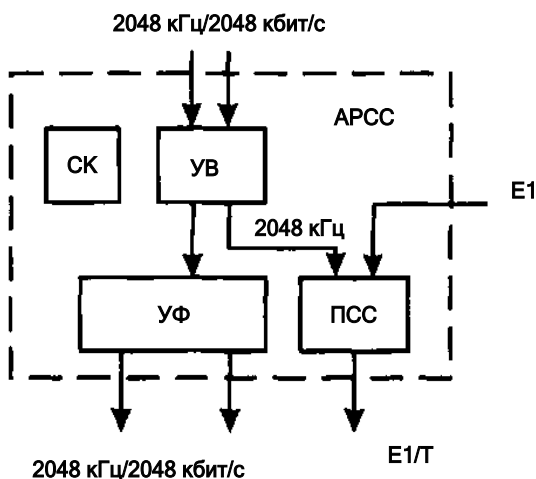


Рисунок 9.5 – Схема аппаратуры распределения сигналов синхронизации

Устройство выбора сигнала синхронизации (УВ) принимает сигналы в виде как последовательности 2048 кГц, так и 2048 кбит/с. Выбор производится в соответствии с установленным приоритетом. Из выбранного в АРСС сигнала синхронизации выделяется последовательность 2048 кГц, которая подается на устройство формирования выходных сигналов (УФ).

Выходной тактовый сигнал формируется в виде последовательностей 2048 кГц или 2048 кбит/с. Выделенная последовательность 2048 кГц в устройстве выбора сигналов синхронизации подается также на устройство ПСС, куда может быть подключен какой-либо информационный сигнал Е1 для восстановления в нем тактовой частоты, пригодной для использования в системе тактовой синхронизации.

Как видно из схемы, АРСС не имеет в составе генератора, поэтому при пропадании входных сигналов пропадают и сигналы на выходе, а вместо тактированного сигнала Е1/Т на выход ПСС проходит сигнал Е1 без преобразований.

9.3 Аппаратура переключения каналов

Первичная сеть представляет собой совокупность сетевых узлов (СУ), сетевых станций (СС) и линий передачи (ЛП), образующих сеть типовых каналов и групповых трактов. Развитие цифровых систем передачи информации, их распространение в сетях связи привело к тому, что сегодня ЦСП образуют уже не просто цифровые острова на аналоговых сетях, а полностью цифровые региональные сети, включающие все уровни – от магистрального до местного. Сформировались полностью цифровые сетевые узлы первичных сетей, где сходятся линейные тракты ЦСП и ВОСП с разных направлений и где производится перераспределение сетевых трактов и каналов. Требования сохранения качества цифровых каналов и трактов, проходящих через узлы, приводят к необходимости организовывать транзит и перераспределение цифровых сигналов в цифровом виде, с минимальным числом преобразований. Поэтому в узлах вместо стационарных кроссовых стоек все чаще используется электронная аппаратура оперативного переключения каналов и трактов (АП). В литературе часто используется термин кросс-коммутатор (cross-connect, Digital Cross-Connect – DXC). Этот коммутатор нельзя путать с коммутаторами вторичной сети, так как аппаратура транзита и переключения используется только для установки полупостоянных соединений в процессе управления первичной сетью.

В отличие от СУ на сетевых станциях, как правило, не производится маршрутизация каналов первичной сети. Их основное назначение – организация каналов и групповых трактов и предоставление их

вторичным сетям, поэтому на сетевых станциях устанавливается окончательное оборудование систем передачи.

Аппаратура переключения в общем случае может работать как с сигналами PDH/ПЦИ, так и с сигналами SDH/СЦИ. Так же как и мультиплексоры синхронной иерархии, может оборудоваться различными интерфейсами, включая организацию защиты по схеме «1 + 1».

Использование АП при построении первичной сети может рассматриваться как одно из самых существенных явлений на современном этапе развития цифровых сетей. Их применение позволяет упростить решение следующих задач:

- перераспределения цифровых каналов и трактов большой пропускной способности, тогда как ранее эту задачу можно было решить только установкой отдельного оборудования временного группообразования (ОВГ) для мультиплексирования и демultipлексирования принимаемых на СУ цифровых трактов;

- оптимального взаимодействия между сетями, построенными на оборудовании PDH/ПЦИ и SDH/СЦИ;

- управления потоками, проходящими через узел, и построения во взаимодействии с оборудованием SDH/СЦИ системы управления первичной сетью в пределах нескольких узлов или региона.

В крупных узлах обычно организуются центры управления сетью связи, куда стекается вся информация из соответствующих систем управления системами передачи. С целью сбора такой информации и взаимодействия с удаленными элементами сети на СУ организуется локальная сеть, к которой подключаются системы передачи, имеющие возможности удаленного управления.

Работа такого комплекса цифрового оборудования, особенно необходимость переключения потоков разных направлений, взаимодействия с цифровым оборудованием вторичных сетей – узлами коммутации и передачи данных, – требует синхронизации цифровых сигналов всех направлений приема и передачи в масштабах цифровой сети. Для этого организуется сеть сетевой тактовой синхронизации, соответствующая часть которой, например аппаратура ВЗГ, должна быть установлена на узле.

Современные мультиплексоры, в частности универсальные мультиплексоры SDH/СЦИ, являются многофункциональными устройствами. Поэтому на промежуточных станциях железнодорожных

линий передачи установка таких мультиплексоров, включенных в линию топологии «линейная цепь», или «кольцо», обеспечивает минимально необходимые функции для данной станции – прием линейного сигнала с двух направлений передачи, выделение каналов для потребителей вторичной сети и, если это необходимо, их перераспределение в пределах организованного транспортного потока STM-N.

В общем случае мультиплексор может рассматриваться как некоторая многопортовая сеть, связывающая три типа портов: линейные порты ввода/вывода (in), линейные порты вывода/ввода (out) и трибные порты ввода/вывода (trib). Ядром такого мультиплексора является неблокируемая, полностью доступная (в общем случае с трех сторон – in, out, trib) матрица размером $N \times N$ (рисунок 9.6). В мультиплексорах синхронной иерархии матрица является микроконтроллером и обеспечивает в общем случае коммутацию сигналов на уровне трибутарных блоков следующих уровней: TU-1 (1,5 или 2 Мбит/с), TU-2 (6 Мбит/с), TU-3 (34 или 45 Мбит/с) и AU-4 (140 Мбит/с). При этом возможна организация как однонаправленных, так и двунаправленных соединений типа: in-out, out-in, in-trib, trib-in, trib-out, out-trib, trib-trib.

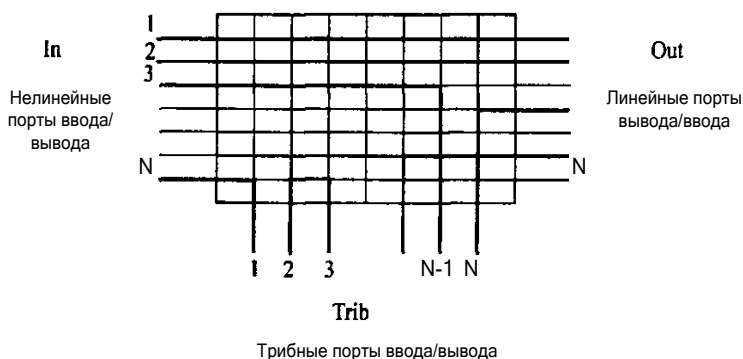
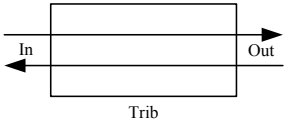
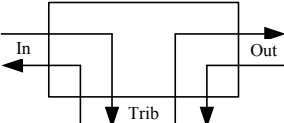
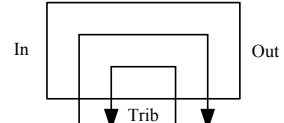
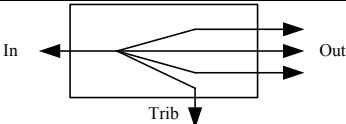
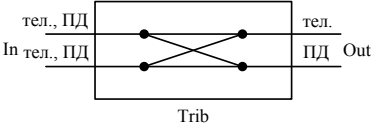


Рисунок 9.6 – Матрица переключений мультиплексора

Первые два типа (in-out, out-in) относятся к классу проходных соединений, следующие четыре (in-trib, trib-in, trib-out, out-trib) – к классу внутренних и последний (trib-trib) – к классу локальных (таблица 9.1)

Таблица 9.1 – Типы соединений потоков в мультиплексоре

| Тип соединения | Конфигурация |
|----------------|---|
| Проходной |  |
| Внутренний |  |
| Локальный |  |
| Трансляция |  |
| Сортировка |  |

В рамках рассмотренных типов соединений возможна реализация специальных функций АП, таких как трансляция от точки к многоточию (иногда такой режим называют режимом вещания), сортировка или перегруппировка потоков или виртуальных контейнеров VC (grooming) с целью создания нескольких упорядоченных, например по типу, потоков или контейнеров VC из общего потока, поступающего на коммутатор (часто используется для сортировки трактов со смешанной нагрузкой в тракты с однотипной нагрузкой, например телефонные каналы на выходе коммутатора группируются в один тракт, а данные – в другой).

Кросс-коннекторы стали появляться по мере развития цифровых сетей связи. Сначала это были мультиплексоры РДН/ПЦИ с функциями выделения/ввода каналов, затем с функциями перераспределения

каналов внутри цифровых трактов, а затем появились и сами кросс-коннекторы как отдельные устройства. В крупных узлах растущих сетей появилась необходимость устанавливать аппаратуру с гораздо большим числом портов, чем у мультиплексоров (несколько сотен портов STM-1 или несколько тысяч портов 2 Мбит/с).

Оборудование АП, применяемое в цифровых сетях связи, можно разделить на **3 основных типа**:

- коммутирующее сигнал плезиохронной иерархии;
- коммутирующее сигнал плезиохронной и синхронной иерархий;
- коммутирующее оптические сигналы WDM (оптические кросс-коммутаторы ODXC).

Аппаратура переключений PDH/ПЦИ в свою очередь подразделяется на кросс-коннекторы, где обрабатываются сигналы первичных трактов 2,048 кбит/с, т. е. осуществляется перераспределение основных цифровых каналов с пропускной способностью 64 кбит/с и каналов $N \times 64$ кбит/с, и кросс-коннекторы для коммутации стандартных цифровых трактов PDH/ПЦИ от 2 до 140 Мбит/с.

Второй тип АП работает на уровне SDH/СЦИ, но из-за прозрачности контейнеров КС для сигналов PDH/ПЦИ можно говорить о коммутациях не только контейнеров SDH/СЦИ, но и стандартных цифровых трактов плезиохронной иерархии.

Оптические кросс-коннекторы коммутируют широкополосные сигналы SDH/СЦИ, АТМ, передаваемые на определенной длине волн оптического спектра.

Основные элементы АЛ – это интерфейсные платы (ИП) со стандартными стыками PDH/ПЦИ или SDH/СЦИ, коммутационное поле (КП) и устройство управления (УУ).

Полупостоянные соединения цифровых каналов и трактов рядной пропускной способности устанавливаются в КП. УУ выдает команды на образование полупостоянных соединений либо автономно (автоматически или оператором), либо получая соответствующую информацию от системы управления первичной сети. Так как АП устанавливается в узлах сети и во многом определяет их надежность, коммутационное поле, блоки питания и управления обычно имеют двойное резервирование. Обеспечивается также «горячая» замена модулей, без перерыва основного трафика, входящего через АЛ.

Обычно АЛ строят таким образом, чтобы ее конфигурация позволяла наращивать оборудование по мере роста сети связи, т. к. увеличивается число пользователей или внедряются новые услуги.

АЛ с перераспределением ОЦК внутри ПЦК используется в низкоскоростных сетях доступа для организации узлов цифровых сетей, где велико число потребителей телефонных каналов. В зависимости от масштабов сети емкость такой аппаратуры может быть от десятков до сотен каналов Е1.

Программируемая пользователем таблица соединений определяет соединение временного интервала 64 кбит/с любого интерфейсного тракта Е1 с любым аналогичным временным интервалом на другом внешнем интерфейсе.

Структурная схема коммутационного поля АЛ с коммутацией потоков 2 048 кбит/с и выше может быть сформирована в нескольких вариантах, которые, в свою очередь, зависят от необходимости сопряжения трактов плезиохронной и синхронной иерархий, поддержки совместной работы линейных трактов, образованных посредством различных направляющих систем, и т. п.

Коммутационное поле может рассматриваться как последовательное соединение мультиплексоров, преобразующих цифровые потоки смежных уровней ЦСП (140 в 34 Мбит/с, 34 в 8 Мбит/с, 8 в 2 Мбит/с) и коммутаторов цифровых трактов с пропускной способностью 2 (ПЦТ), 8 (ВЦТ), 34 Мбит/с (ТЦТ), расположенных между мультиплексорами. За счет полупостоянных соединений во всех или в нескольких коммутаторах могут быть реализованы любые структуры перераспределения трактов PDH/ПЦИ.

АП, коммутирующая тракты SDH/СЦИ, отличается от предыдущих видов принципом построения коммутационного поля, который основан на возможности перераспределения полезной нагрузки, упакованной в виртуальные контейнеры VC-*n* в пределах трибуртарных и административных блоков TU и AU. Кросс-коннекторы SDH/СЦИ различают в зависимости от того, какие виртуальные контейнеры они могут коммутировать. Их обозначение в общем случае имеет вид SDXC *n/m*, где *n* означает номер виртуального контейнера, который коммутатор может принять на вход, а *m* – номер максимально возможного уровня виртуального контейнера, который он способен коммутировать. Иногда вместо номера виртуального контейнера указывают набор коммутируемых виртуальных контейнеров, напри-

мер, $m/p/q$. Так, например, для уровня STM-1 могут быть указаны следующие типы:

- SDXC 4/4 позволяет перераспределять контейнеры VC-4, т. е. имеет интерфейсы только для сигналов 140 и 155 Мбит/с;
- SDXC 4/1 позволяет принимать потоки 140 и 155 Мбит/с и перераспределять в них контейнеры VC-1, соответственно, имеет интерфейсы для сигналов 1,5 или 2 Мбит/с;
- SDXC 4/3/1 позволяет принимать потоки 140 и 155 Мбит/с и обрабатывать VC-4, VC-3, VC-1, соответственно, имеет интерфейсы для сигналов 34 или 45, и 1,5 или 2 Мбит/с.

Как видно из этого перечня, интерфейсные платы в SDXC могут быть как для сигналов SDH/СЦИ, так и для PDH/ПЦИ.

Емкость АП зависит от потребностей конкретного оператора сети. Оборудование АП устанавливается в стандартных стойках и имеет модульную структуру. Производители, выпускающие аппаратуру для крупных международных операторов связи, предлагают АП емкостью до нескольких тысяч портов, каждый из которых ориентирован на пропускную способность 140+155 Мбит/с и выше.

Функция кроссовой коммутации используется и в полностью оптических сетях, построенных на основе технологии DWDM. При этом коммутационное поле, построенное на оптических компонентах, может входить в состав аппаратуры спектральных мультиплекторов ввода/вывода или (в крупных сетях) в состав самостоятельной аппаратуры переключения – оптических кросс-коннекторов (ОХС – Optical X-Connector). ОХС является оптическим телекоммуникационным устройством, содержащим N входов и N выходов и обеспечивает направление оптических сигналов с входного порта на выходной без их промежуточных преобразований в электрическую форму. Таким образом производится перераспределение спектральных каналов внутри агрегатных потоков WDM.

Мощность современных кросс-коннекторов определяется их размерностью, максимальными скоростями переключения и скоростями входящих оптических сигналов.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение тактовой синхронизации цифровых сетей связи.
- 2 Принципы построения тактовой сетевой синхронизации.
- 3 Источники синхронизации цифровых сетей связи.

10 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ СЕТЬЮ СВЯЗИ

Сети связи железных дорог интегрируют сети связи дорожного и отделенческого уровней, в состав которых входят аналоговые и цифровые первичные и вторичные сети связи, обеспечивающие передачу требуемого объема информации в системах информатизации и управления железнодорожным транспортом.

В цифровых сетях связи необходимым условием для обеспечения надежного, гибкого управления и качественного технического обслуживания является система управления с достаточными функциональными возможностями.

Система управления сетью связи предназначена для выполнения следующих функций:

- осуществление эффективного мониторинга и управления оборудованием сетей связи дорожного и отделенческого уровней;
- обеспечение эффективного функционирования всех направлений и участков сетей связи;
- рациональное использование и развитие связанных ресурсов в целях наилучшего удовлетворения потребностей технологического сегмента (управления перевозочным процессом) и коммерческого сегментов (управление качеством услуг);
- поддержание надежности сетей связи в условиях чрезвычайных ситуаций и дестабилизирующих факторов;
- удовлетворение требований и запросов пользователей услуг связи.

Для достижения поставленных целей система управления в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т (М.3010, М.3200, М.3400) должна управлять:

- конфигурацией сети связи;
- последствиями отказов;
- качественными показателями сети связи;
- производить расчеты с пользователями сети связи;
- предусматривать защиту сообщений (информации) от несанкционированного доступа к ней.

При управлении конфигурацией сети предусмотрено решение следующих задач: формирование и развитие сети связи.

Контрольные вопросы

- 1 Основные задачи управления сетью связи.
- 2 Цели и пути достижения эффекта управления.

11 ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

11.1 Общие сведения

Главными документами, устанавливающими основные положения по технической эксплуатации линий и систем передачи на железных дорогах и порядок взаимодействия технического персонала по их содержанию в исправном состоянии устанавливают Правила технической эксплуатации железной дороги и другие нормативные документы. На основании нормативов затрат труда по эксплуатации технических средств ВОЛП разрабатываются технологические процессы проведения регламентных работ и другая нормативно-техническая и производственная документация. При этом стратегия технической эксплуатации должна обеспечить устойчивое и надежное содержание действующих средств связи.

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;
- ведомственная нормативная документация.

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 испыта-

ний для сведения к минимуму профилактического обслуживания и уменьшения восстановительных работ.

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 SDH/СЦИ, электропитающих устройств, системы тактовой сетевой синхронизации, систем охранно-пожарной сигнализации (ОПС), стационарного оборудования, кондиционирования и т.п.

Текущее обслуживание ВОЛП включает следующие работы: расчистка 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 стационарного оборудования.

Планово-профилактическое обслуживание предусматривает: измерение параметров кабелей и стационарного 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; установка предупредительных знаков; проверка работоспособности стационарного оборудования в соответствии с технологическими картами.

Основными задачами технической эксплуатации ВОЛП в пределах установленных линейных участков являются:

- содержание линии передачи в соответствии с требованиями действующих технических норм;
- обеспечение требуемой надежности системы передачи;
- проведение аварийно-восстановительных работ;
- проведение работ по обеспечению сохранности линии связи;
- сбор статистических данных о состоянии системы 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.

Техническое обслуживание ВОЛП 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.

Проблема технического обслуживания ВОЛП на сегодня является одной из актуальных.

11.2 Ремонт волоконно-оптических линий связи

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

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 и проверка узлов и элементов поддерживающих конструкций;
- регулировка стрелы провеса ВОК;
- проверка закрепления ВОК на опорах;
- регулировка расстояний между ВОК и проводами, подвешенными на опорах;
- замена и восстановление отдельных изношенных, неисправных и поврежденных элементов поддерживающих конструкций;
- ремонт ВОК (в случае повреждения, не вызвавшего перерыва связи);
- замена и восстановление отдельных частей станционного оборудования.

Средний ремонт станционного оборудования и капитальный ремонт ЛКС производят периодически на основании данных контрольно-технических осмотров, проверок и дефектных ведомостей.

Порядок выполнения среднего и капитального ремонтов устанавливается соответствующими документами оператора сети связи магистрального уровня.

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

11.3 Аварийно-восстановительные работы

К аварийно-восстановительным работам (АВР) относятся работы, проводимые с целью оперативного восстановления работоспособности линейных сооружений ВОЛС и станционного оборудования ВОЛП.

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 линейно-кабельных участков 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 включения 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.

Контрольные вопросы

- 1 Документы, на которых базируется техническая эксплуатация ВОЛП.
- 2 Основные задачи технического обслуживания ВОЛП.
- 3 Основные виды работ при техническом обслуживании.

12 ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Электропитающие установки (ЭПУ) или электропитающее оборудование предназначены для преобразования, регулирования и распределения постоянного и переменного напряжений, необходимых для нормальной работы аппаратуры и систем ВОЛП, радиосвязи и др.

В зависимости от рода тока ЭПУ подразделяются на устройства переменного и постоянного токов. По способу электропитания систем и аппаратуры ЭПУ подразделяются на системы с централизованным и децентрализованным (автономным) питанием. Как при централизованном, так и автономном питании необходимо обеспечить бесперебойное питание аппаратуры систем передачи и другого оборудования дома связи, ЛАЦ и др.

Для электропитания постоянным током систем связи и аппаратуры (ЖАТС, междугородние телефонные станции коммутации, радиостанции ПРС поездной радиосвязи) должны предусматриваться следующие номинальные напряжения: 24, 48 и 60 В. При этом обычно отрицательный полюс источника постоянного напряжения заземляется.

При централизованном питании общие для всех цехов (объектов) ЭПУ размещаются в отдельном помещении. При этом для питания используются аккумуляторные батареи, которые размещаются в специальных помещениях – аккумуляторных.

При автономной системе электропитания ЭПУ размещаются непосредственно в помещениях, где находятся системы передачи или входит в комплект системы передачи или другой аппаратуры, и позволяет организовать бесперебойное питание аппаратуры связи постоянным током с выходным напряжением 48 или 60 В и значениями выпрямленного тока 5, 10 и 15 А. В состав бесперебойного питания входит выпрямитель с включенной в буферном режиме аккумуляторной батареей из герметизированных безуходных аккумуляторов батарей. Емкость батареи должна обеспечивать 6-часовой аварийный режим питания подключенного к ней оборудования.

Децентрализованное (автономное) питание на постоянном токе с автоматизированным поддержанием номинального напряжения с одно- или двухгрупповыми аккумуляторными батареями, работающими с выпрямительными устройствами в буферном режиме. Запас

емкости аккумуляторных батарей должен обеспечивать при отсутствии энергоснабжения со стороны переменного напряжения в течение 2 часов при наличии в здании узла связи стационарной резервной электростанции. При использовании передвижной резервной электростанции – 6 часов.

В качестве резервной электростанции обычно используют дизель-генераторные автоматизированные установки (ДГА), которые должны обеспечивать электроэнергией всю аппаратуру связи, питаемую переменным и постоянным током; сеть гарантированного освещения; устройства вентиляции аккумуляторных помещений; собственные нужды электростанции (освещение, отопление, вентиляцию).

Как при централизованном питании, так и децентрализованном, ЭПУ должны соответствовать техническим требованиям на аппаратуру по номиналам напряжений, отвечать допустимым пределам изменения их величин, а в случае питания аппаратуры выпрямленным постоянным напряжением и допустимым величинам пульсаций.

В состав ЭПУ входят следующие устройства:

- выпрямительные устройства;
- аккумуляторные батареи;
- установки бесперебойного питания постоянным или переменным током;
- преобразователи и стабилизаторы напряжения, необходимые для обеспечения заданных показателей опорного напряжения;
- коммутационное оборудование;
- токораспределительные сети, соединяющие между собой оборудование электропитания, аппаратуру связи и поездной радиосвязи.

Токораспределительная сеть для питания аппаратуры, как правило, является радиальной. В соответствии с этим предусматривается прокладка с выхода ЭПУ к каждой стойке отдельных токопроводов (с незаземленными и заземленными полюсами).

Контрольные вопросы

- 1 Назначение электропитающих установок переменного и постоянного тока.
- 2 Принципы централизованного и децентрализованного электропитания, преимущества и недостатки.
- 3 Номинальные напряжения переменного и постоянного тока.
- 4 Обеспечение бесперебойного питания.

13 НАДЕЖНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЕТИ СВЯЗИ

13.1 Общие сведения

Надежность сети связи является одними из основных технических и экономических показателей на данном этапе развития техники связи, особенно для дорожных сетей связи и ВОЛП по многим причинам. В первую очередь, это связано с тем, что сети связи являются составным элементом, обеспечивающим безопасность перевозки пассажиров и грузов на железнодорожном транспорте, во-вторых, по сетям связи обращаются огромные потоки сообщений, несущих информацию для управления железнодорожным транспортом на всем полигоне железных дорог. Потеря связи в этом случае означает потерю управления со всеми вытекающими отсюда последствиями. В-третьих, сети связи железных дорог обеспечивают связь коммерческого сегмента. Потеря связи в этом случае приводит к снижению качества обслуживания абонентов и конкурентоспособности и, самое главное, к потере прибыли.

Основные понятия надежности регламентированы государственным стандартом ГОСТ 27.002-89 “Надежность в технике. Термины и определения”.

Надежность ВОЛП – комплексная проблема и определяется надежностью каналов передачи, линейных и сетевых трактов, узлов и станций первичной сети связи. Каналы и тракты систем передачи первичной сети характеризуются коэффициентами готовности и неготовности. Коэффициент готовности K_r определяется как отношение времени, в течение которого канал (тракт) находится в состоянии готовности, к общему времени наблюдения (не менее трех месяцев). Коэффициент неготовности $K_{нг}$ канала (тракта) определяется как отношение времени, в течение которого канал находится в состоянии неготовности, к общему времени наблюдения. Обычно между K_r и $K_{нг}$ соблюдается соотношение

$$K_r + K_{нг} = 1.$$

В соответствии с Рекомендациями МСЭ-Т G.821, G.826, M.2100 и M.2120 состояния неготовности, в свою очередь, подразделяются на состояния сбоя и отказа. Основными показателями надежности кана-

лов передачи и сетевых трактов систем передачи первичной сети являются:

- коэффициент готовности по сбоям $K_{Гс}$;
- коэффициент готовности по отказам $K_{Го}$;
- среднее время между сбоями $T_{ос}$;
- среднее время между отказами $T_{оо}$;
- среднее время восстановления по сбоям $T_{вс}$;
- среднее время восстановления по отказам $T_{во}$.

Критерием сбоя в канале ТЧ (независимо от типа системы передачи, с помощью которой был образован канал) применяется перерыв в передаче сообщений длительностью более 0,30 мс. В качестве критерия отказа канала ТЧ применяется перерыв в передаче сообщений продолжительностью более 10 с. В цифровых системах передачи за критерий отказа ОКЦ принимается повышение коэффициента ошибок до 10 и более в секунду в течение десяти последовательных секунд, учитываемых по времени неготовности, а критерием восстановления – уменьшение коэффициента ошибок до величины 9 и меньше в секунду в течение десяти последовательных секунд, учитываемых во времени готовности.

Установление факторов, влияющих на показатели надежности ВОЛП, является одной из основных и сложных проблем. Отказы ВОК, заключающиеся в нарушении работоспособного состояния одной, нескольких или всех ОВ, так же, как и отказы узлов и компонентов систем передачи приводят к нарушению связи по многим тысячам каналов. Поэтому проблемы надежности ВОЛП рассчитывают и прогнозируют на всех этапах планирования, проектирования и строительства ДЦСС.

Количественная оценка надежности связана, в первую очередь, с получением достоверной статистики отказов МЦСС для случая подвески ВОК на опорах контактной сети и линий автоблокировки.

В последние годы интенсивно строятся и вводятся в эксплуатацию цифровые сети связи общегосударственного и ведомственного назначения. Для этих целей применяются ВОК различных модификаций, мультиплексорное оборудование систем передачи SDH/СЦИ и соответствующие им ЭПУ. На основе этого оборудования и устройств создаются ВОЛП, которые в совокупности с системой тактовой синхронизации и централизованного управления сетью

образуют первичную (транспортную) цифровую сеть связи для передачи потребителям любого вида информации.

При проектировании и строительстве ВОЛП применяются различные типы ВОК, а также их прокладка непосредственно в грунт, в трубопроводы, подвеска на опорах воздушных линий связи, электропередачи и др. Методы прокладки во многом определяются технико-экономическими показателями. Например, на железнодорожном транспорте широко используется подвеска ВОК на опорах высоковольтных линий электропередач и опорах контактной сети электрифицированных железных дорог. При этом капитальные затраты на строительство снижаются до 30 % относительно его подземной прокладки, сокращается время строительства. Одновременно обеспечиваются практически идеальные условия для осмотра линейно-кабельных сооружений (ЛКС) при планировании регламентных и профилактических работ в процессе технической эксплуатации ВОЛП, создаются благоприятные возможности для своевременного подъезда эксплуатационного персонала к месту производства работ, в том числе и аварийно-восстановительных.

В то же время, подвеска ВОК на опорах, в отличие от его подземной прокладки, в большей степени подвержена воздействию метеорологических и других условий, что отрицательно влияет на устойчивость и надежность ВОЛП.

13.2 Факторы, влияющие на надежность

При планировании работы ДЦСС необходимо учитывать последствия влияний на ВОЛП внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, а также оценивать меры, которые предпринимаются эксплуатационными подразделениями для обеспечения устойчивой работы сети связи в реальных условиях окружающей среды и принятой системы технической эксплуатации (СТЭ).

Внешние воздействующие факторы, влияющие на работоспособность ВОЛП, зависят от способа прокладки ВОК, метода технической эксплуатации и др. Так, к специфическим внешним факторам, влияющим на работоспособность ВОЛП, в случае подвески ВОК на опорах, могут быть отнесены колебания и вибрации, вызванные природными явлениями и движущимся транспортом, повреждений кабеля в результате падения опор, злоумышленных действий населе-

ния, электрических разрядов молнии, проведения несанкционированных строительных работ в зоне прохождения кабеля и других причин, связанных с нарушением правил охраны линий связи.

К внутренним воздействующим факторам относятся те физические явления, которые проявляются непосредственно при функционировании технических средств ВОЛП и которые могут привести к снижению качества или прекращению связи между потребителями сети, то есть к отказу. К числу наиболее частых отказов, вызванных внутренними факторами, относятся увеличение затухания или обрывы оптических волокон, нарушение работоспособности сетевого оборудования, недостаточная квалификация технического персонала, несоответствие первичного электроснабжения техническим требованиям и другие причины. В целом следует отметить, что перечень внутренних факторов имеет тенденцию к расширению.

Одним из факторов, влияющих на надежность ВОЛП, является усталостное разрушение ОВ.

В таблице 13.1 приведена классификация внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, влияющих на надежность LWCC/ДЦСС.

В результате проведенных исследований и анализа статистики отказов, полученных в процессе реальной технической эксплуатации ВОЛП, было показано, что по степени воздействия на ВОЛП дестабилизирующие факторы условно можно разделить на три группы (см. таблицу 13.1):

- внешние воздействующие факторы, непосредственно связанные с производственной деятельностью железных дорог и состоянием их инфраструктуры (группа А);
- внешние воздействующие факторы, косвенно связанные или вообще не связанные с работой железнодорожного или других видов транспорта и содержанием его инфраструктуры (группа В);
- внутренние воздействующие факторы, связанные с состоянием свойств ВОЛП и ее технической эксплуатацией, рассматриваемые в виде единой системы (группа С).

Анализ факторов группы А показывает, что факторы А1–А7 оказывают дестабилизирующее воздействие на ЛКС при подвеске кабеля на опорах и только фактор А2 воздействует на ЛКС при прокладке кабеля в грунте или тросопроводе. Фактор А5 непосредственно

оказывает влияние на работоспособность сетевого электронного оборудования (СЭО).

Таблица 13.1 – Классификация внешних и внутренних дестабилизирующих факторов

| Факторы | | |
|--|--|--|
| Внешние (группа А) | Внешние (группа В) | Внутренние (группа С) |
| Рушение и падение опор КС и Б | Производство СМР в зоне ВОК | Нарушения работоспособности СЭО |
| Технические воздействия на ВОК | Акты вандализма | Увеличение затухания или обрыв ВОК |
| Падение деревьев на ВОК | Возгорания в зоне ВОК | Отказ оптических излучателей |
| Возгорание подвижного состава | Строительство ВОЛП с отклонением от проекта | Нарушение требований НТД |
| Несоответствие внешнего электроснабжения техническим требованиям | Разрушение ВОК от грозовых ударов молнии | Недостаточная квалификация эксплуатационного персонала |
| Электромагнитные влияния на ВОК | Различные вибрации от внешних воздействий | Неукомплектованность персонала техническими средствами и ЗИП |
| Нарушения правил охраны ВОЛС | Климатические факторы (температура, радиация и др.) | Перцептивные нагрузки |
| – | Метеорологические условия (туман, изломан лед и др.) | – |
| – | Время года и суток | – |
| – | Рельеф местности и подъездные дороги | – |

Дестабилизирующее воздействие на ЛКС факторов группы А приводит либо к растяжению кабеля и оптических волокон (то есть к их частичному повреждению), либо к полному обрыву ВОК с разрушением конструктивных элементов подвески. В любом случае это нарушает работоспособность ВОЛП и требует проведения аварийно-восстановительных работ или в лучшем случае – регламентных. При этом практически во всех случаях невозможно (или достаточно сложно) прогнозировать отказы группы А, являющиеся случайными событиями с неизвестными значениями их распределения.

При эксплуатации ВОК большой ущерб наносят грызуны. Повреждения ВОК грызунами происходит от их роющей и грызущей деятельности. Для защиты ВОК от грызунов используются механические и химические способы.

В качестве математического аппарата для оценки влияния факторов группы А на показатели надежности ВОЛП могут быть использованы методы статистического моделирования, основанные на реальной статистике отказов или имитационного моделирования, основанные на искусственно созданной статистике отказов ВОЛП за счет моделирования процессов ее работоспособности (эксплуатации) во времени и пространстве географических зон. Отказы первичной сети электроснабжения на качество работы СЭО не приводят к мгновенному их выбытию из эксплуатации, так как система электропитания по переменному току резервируется аккумуляторными батареями, способными поддерживать СЭО в рабочем состоянии не менее 24 часов. Этого времени вполне достаточно для восстановления первичной сети электроснабжения после ее отказа.

Наибольшее количество внешних факторов относится к группе В, которые по степени важности (исходя из статистики отказов) распределены в следующем порядке: В1 – санкционированное и несанкционированное производство ремонтно-строительных работ в охранной зоне прохода ВОК; В2 – акты вандализма; В3 – различного рода возгорания в зоне прохода подвесного ВОК; В4 – отклонения от технологии проектирования и строительства ВОЛП; В5 – разрушение подвесного ВОК вследствие удара молнии; В6 – ветровые нагрузки, колебания и вибрации, вызванные природными явлениями и движущимся железнодорожным транспортом; В7 – климатические факторы (температура окружающей среды и ее градиент); В8 – метеорологические условия (туман, роса, дождь, град, иней, снег, лед); В9 – времена года и суток; В10 – характеристики рельефа местности и подъездных дорог.

Из перечисленного количества внешних факторов группы В дестабилизирующие воздействия на ЛКС при подвеске кабеля на опорах оказывают все десять факторов; при прокладке кабеля в грунте или трубопроводе дестабилизирующее воздействие оказывают шесть факторов (В1, В2, В4, В8–В10) с интенсивностью отказов, равной или меньшей плотности повреждений подвесного ВОК. Факторы В4

и В7 непосредственно влияют на работоспособность СЭО, а факторы В8–В10 – только в части своевременного восстановления отказа.

Внешние факторы группы В7–В10 по своему воздействию на СЭО и ЛКС с подвеской кабеля на опорах, а также при его прокладке в грунт и трубопровод имеют одно и то же воздействующее значение, связанное с оперативной доставкой к месту работ эксплуатационных бригад, ЗИП и расходных материалов, а также затратами времени на устранение отказа. По своей сути снижения их дестабилизирующего влияния на устойчивое состояние ВОЛП можно добиться только в том случае, когда реакция технического персонала служб эксплуатации и снабжения, направленная на обеспечение заданных численных значений показателей качества, будет быстрой, слаженной и сможет удержать в заданных пределах нормативные значения времени наработки на отказ и восстановление.

Следовательно, эти факторы необходимо учитывать при оптимизации системы технического обслуживания ВОЛП, решая при этом следующие задачи:

- оценка влияния факторов на производительность труда работников служб эксплуатации и ремонтных подразделений;
- расчет времени доставки ремонтных бригад, ЗИП и расходных материалов к месту повреждения ВОЛП, при разных комбинациях воздействия подгрупп В7–В10;
- рациональное накопление и хранение знаний о взаимосвязях внешних воздействий подгрупп В7–В10 с показателями функционирования ВОЛП;
- оптимизация мест размещения эксплуатационных подразделений, запасных инструментов и приборов (ЗИП) и материалов с учетом воздействия природно-климатических факторов и т. п.

Фактор В7, согласно результатам экспертного опроса и статистики наблюдения, имеет шесть весовых коэффициентов (градаций) по степени влияния на показатели качества и функционирования ВОЛП, т. е. диапазонов температуры, индексация и весовые коэффициенты которых представлены в таблице 13.2.

Группу риска для подвесного ВОК представляет фактор В6 – ветровые нагрузки, колебания и вибрации, вызванные природными явлениями (факторы В7 и В8) и движущимся железнодорожным или другим транспортом. Суть проблемы заключается в том, что на ВОК

резко увеличиваются механические нагрузки при одновременном воздействии ветра, льда и вибраций от проходящего транспорта, которые могут привести к повреждению оптических волокон или ухудшению их параметров (затухания, дисперсии и т. п.). Следовательно, эти процессы подлежат тщательному исследованию и определению степени их воздействия на ВОЛП, используя для этих целей различные математические модели.

Таблица 13.2 – Диапазон температур переменной В7

| Диапазон температур, °С | Температура | Условное обозначение | Весовой коэффициент |
|-------------------------|----------------|----------------------|---------------------|
| -50...-4 | Низкая | <i>I</i> | 6 |
| -3,9...+4 | Выпадение росы | <i>r</i> | 8 |
| +4,1...+18 | Пониженная | <i>f</i> | 3 |
| +18,1...+28 | Нормальная | <i>n</i> | 1 |
| +28,1...+38 | Повышенная | <i>e</i> | 2 |
| +38,1...+70 | Высокая | <i>h</i> | 3 |

Подгруппа В1–В4 имеет очень важное значение, поскольку причиной заметного числа неисправностей и отказов технических средств ВОЛП является неумышленное или умышленное дестабилизирующее воздействие человека, практически не имеющего отношения к техническим средствам ЛКС и СЭО (внешний человеческий фактор). Исследование аналитическим методом влияния воздействий подгруппы В1–В4 на показатели качества работы ВОЛП затруднено, так как связано с необходимостью количественных оценок явлений, плохо поддающихся формализации. Группа этих факторов определяется низким уровнем социально-экономического состояния общества и производственно-технологической дисциплины при выполнении ремонтно-строительных работ в зоне прохождения ВОЛП.

Факторы подгрупп В4 и В7 на работоспособность СЭО оказывают незначительное влияние и связаны с ошибками, допущенными в процессе проектирования системы ВОЛП, выполнения пусконаладочных

работ, и которые, как правило, выявляются в начальный период технической эксплуатации сетевого электронного оборудования. К группе В7 следует отнести также радиоактивный фон в зоне прокладки ВОК на опорах. В настоящее время это влияние мало изучено.

Важное значение для работы СЭО имеет температурный фактор внутри помещений узлов связи, так как превышение температуры (например, за счет поломки кондиционера) может привести сетевое оборудование в состояние отказа.

Группу С характеризуют внутренние воздействующие факторы, влияющие на работоспособность агрегатированной системы ВОЛП и ее технической эксплуатации; С1 – нарушения работоспособности СЭО; С2 – увеличение затухания или обрывы оптических волокон; С3 – снижение мощности или отказы оптических излучателей; С4 – нарушение требований нормативно-технической документации; С5 – недостаточная квалификация эксплуатационного персонала; С6 – неуккомплектованность эксплуатационного персонала транспортными средствами, измерительной техникой, ЗИП и другими расходными материалами; С7 – перцептивные нагрузки.

Из этого перечня внутренних факторов на интенсивность отказов ЛКС оказывают влияние факторы С2, С4–С7, а на интенсивность отказов СЭО влияют факторы С1, С3–С7. Следовательно, на интенсивность отказов ЛКС и СЭО, т.е. в целом на устойчивое и качественное функционирование ВОЛП, оказывают воздействие практически все внутренние факторы.

Группу С условно можно разделить на два класса факторов, связанных с уровнем качества технического обслуживания ВОЛП и оптимизацией системы технической эксплуатации.

Опыт эксплуатации ВОЛП показал, что при проектировании, строительстве, монтаже, пусконаладочных работ, закупке и организации технического обслуживания допускаются ошибки, которые приводят к появлению большого числа внутренних факторов (С1–С7), нарушающих нормальную работу ВОЛП. Внешним проявлением этих факторов являются отказы ЛКС и СЭО, что снижает время наработки на отказ и увеличивает время восстановления отказов. Поэтому составление перечня отказов и исследование их характеристик неразрывно связано с анализом отказов и разработкой мероприятий по их недопущению или, по крайней мере, снижению количества.

Оптимизация организации системы технической эксплуатации ВОЛП (подгруппа С4–С7) определяется, в первую очередь, уровнем квалификации технического персонала и степенью его соответствия требованиям обслуживания технических средств, т. е. наличием сертификата соответствия.

Важное значение имеют психическое и физическое состояния сотрудников служб эксплуатации, перцептивная нагрузка, организация рабочего места, режим труда и отдыха. Отступление этих факторов от установленных нормативов неизбежно приведет к увеличению вероятности ошибки в принятии решения, организации работы и, как следствие, к снижению качества работы ВОЛП. Факторы группы С связаны с интенсивностью воздействия факторов группы В и при оценке качества функционирования системы эту связь необходимо учитывать.

Принципиальное значение для разработки оптимальной системы технической эксплуатации имеют факторы С4 и С6, связанные с местом размещения и комплектацией эксплуатационного персонала транспортными средствами, ЗИП, расходными материалами, а также нормативно-технической документацией, охватывающей все без исключения технологические процессы по техническому обслуживанию ВОЛП. При этом нормативно-техническая документация (НТД) должна соответствовать требованиям отечественных и международных стандартов, а также отвечать отраслевым правилам и нормам технического обслуживания ВОЛП.

Количественные оценки факторов группы С в значительной степени субъективны и требуют систематического уточнения их численных значений по мере накопления опыта эксплуатации железнодорожных ВОЛП и совершенствования системы учета дестабилизирующего воздействия внешних и внутренних факторов на качественное и устойчивое их функционирование.

13.3 Расчет надежности ВОЛП

Для оценки степени воздействия внешних и внутренних факторов на устойчивую работоспособность ВОЛП необходимо иметь специальный аппарат сбора и обработки информации, её классификации по группам отказов и подготовки базы данных в виде, способствующем для анализа и принятия объективных решений по их устранению. При этом следует иметь в виду, что почти все перечисленные

факторы имеют вероятностный характер, законы распределения их неизвестны или малоизучены. Поэтому необходимо располагать современными методами анализа стохастических свойств дестабилизирующих факторов и синтеза способов количественной оценки их влияния, позволяющих прогнозировать отказы технических средств ВОЛП и формировать наиболее рациональную СТЭ для обеспечения устойчивой работы сети связи.

Надёжность сети – одна из основных характеристик, определяющих качество работы ВОЛП, комплексным показателем которой является коэффициент готовности K_r (или значение коэффициента простоя $K_{п} = 1 - K_r$), а также сопутствующие ему показатели – среднее время наработки на отказ (T_o , ч) и среднее время восстановления (T_v , ч), затрачиваемое на обнаружение отказа, поиск его причин и устранение последствий.

Расчет показателей надежности ВОЛП 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 ВОК, ретрансляционных и усилительных устройств.

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

$$K_r = K_o K_{пв}^N K_{гл}^{L/100},$$

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

Среднее время простоя (недоступности) в течение года определяется коэффициентом

$$K_{п} = 1 - K_r.$$

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 13.3. 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_n умножить на количество часов в году (8760 ч).

Таблица 13.3 – Время простоя системы в зависимости от коэффициента ее 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 допустимое время простоя МЦСС принято $T_n < 0,175$ ч/год, что соответствует коэффициенту простоя $K_n < 0,00002$ или коэффициенту готовности $K_r > 0,99998$ (таблица 13.3).

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

13.4 Способы повышения надежности первичной сети

Повышение надежности первичной сети связи на железных дорогах достигается следующими способами:

- применением аппаратуры с высокими параметрами надежности;
- осуществлением резервирования устройств, систем и кабелей связи;
- проведением мероприятий, направленных на своевременное обнаружение и исправление поврежденной аппаратуры;

– обеспечение надежности функционирования основных систем и оборудования (систем управления, тактовой синхронизации сети, электропитания).

Резервирование линий (направлений) передачи осуществляется следующими методами:

– топология «последовательная линейная цепь». Резервирование заключается в параллельной передаче информации по двум линиям передачи (основной и резервной);

– топология «кольцо». Эта топология обеспечивает резервирование в зависимости от возможности мультиплексора ввода-вывода, как с защитой $1 + 1$, так и с применением схемы резервирования (переключение трафика происходит в граничных с поврежденной секцией мультиплексорах). Сеть связи, построенная по такой топологии, является наиболее надежной.

Повышение надежности систем передачи осуществляется путем резервирования основных блоков (плат) системы:

– полный резерв (реверсивный $1 : 1$, нереверсивный $1 + 1$);

– резервирование $n : 1$, когда на n основных плат (блоков) предусматривается одна резервная.

В качестве резервных и резервируемых трактов могут использоваться тракты кабельных (на металлическом и ВОК), радиорелейных и спутниковых систем передачи.

При резервировании должно обеспечиваться значение требуемых показателей надежности при минимальных общих затратах на резервирование.

Основным фактором минимизации затрат на резервирование (или максимизации прибыли) является сокращение времени предоставления резерва и сокращение благодаря этому длительности простоя резервируемых трактов.

Надежность и безотказность работы аппаратуры также зависит от мероприятий, предусмотренных системой технической эксплуатации, которые позволяют своевременно обнаружить отклонения в работе устройств и устранить их.

Контрольные вопросы

- 1 Показатели надежности и устойчивости ВОЛП.
- 2 Факторы, влияющие на надежность и устойчивость ВОЛП.
- 3 Основные пути повышения надежности.

14 СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

14.1 Общие сведения

В последние годы на железных дорогах начаты работы по обеспечению информационной безопасности, направленной на защиту информационных технологий, информационно-управляющих и информационно-вычислительных систем и сетей, электронной почты и т. д.

В настоящее время и вследствие недостаточной защищенности сети связи и ее управляющих систем имеется возможность:

- несанкционированного доступа к информационным (программно-техническим) и телекоммуникационным ресурсам сети с целью их скрытого использования;
- дезорганизации работы систем управления сетью связи и железных дорог.

Основным направлением обеспечения защиты информационно-технических ресурсов в сети связи является создание комплексной системы обеспечения информационной безопасности сети связи, объединяющей в себе комплексы аппаратно-программных средств защиты и поддерживающих их организационных мер.

14.2 Методы защиты информации от несанкционированного доступа

Почти все преимущества ВОЛС не вызывают сомнений, однако к ним возможно контактное и бесконтактное подключение. Для контактного подключения удаляют защитный слой кабеля, стравливают светоотражающую оболочку и изгибают оптический кабель на необходимый угол (рисунок 14.1).

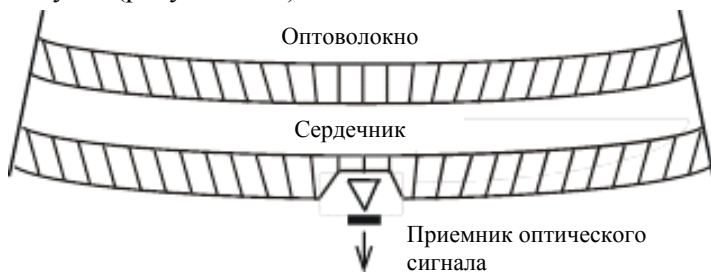


Рисунок 14.1 – Вариант контактного подключения к ВОЛС

При таком подключении к ВОЛС обнаружить утечку информации за счет ослабления мощности излучения бывает очень трудно, так как чтобы прослушать переговоры при существующих приемных устройствах несанкционированного доступа достаточно отобрать всего 0,001 % передаваемой мощности. При этом дополнительные потери, в зависимости от величины изгиба кабеля, составляют всего 0,01–1,0 дБ.

Бесконтактное подключение к ВОЛС осуществляется следующим образом (рисунок 14.2). В качестве элемента съема светового сигнала используется стеклянная трубка, заполненная жидкостью с высоким показателем преломления и с изогнутым концом, жестко фиксированная на оптическом кабеле, с которого предварительно снята экранная оболочка. На отогнутом конце трубки устанавливается объектив, фокусирующий световой поток на фотодиод, а затем этот сигнал подается на усилитель звуковых сигналов.

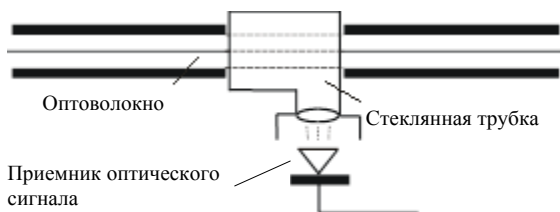


Рисунок 14.2 – Вариант бесконтактного подключения к ВОЛС

Следует отметить, что описанные действия можно выполнить без применения специализированного дорогостоящего инструмента (приемлемая стоимость средств перехвата позволяет их использовать не только организациям, но и частным лицам) и за сравнительно небольшое время. В результате линии связи остаются без разрывов: кабель освобождается лишь от внешних защитных оболочек, а волокна находятся в защитном цветном буфере толщиной 250 мкм.

Уязвимость ВОЛС доказана на практике. А потому в связи с возможностью компрометации передаваемых данных или их модификации необходимо использовать средства защиты информации, передаваемой по ВОЛС.

Вообще трасса прокладки волоконно-оптического кабеля является строго секретной информацией, к ней имеют доступ только работники со специальной группой допуска. На специализированных объектах

(например, военных) при использовании локальных компьютерных волоконно-оптических сетей применяют ограждение территории по периметру сети с использованием охраны и контрольно-пропускных пунктов.

Определенная группа методов защиты информации для ВОЛС связана с разработкой конструкционных, механических и электрических средств защиты от несанкционированного доступа к волоконно-оптическим кабелям, муфтам и оптическим волокнам.

Средства защиты этой группы построены так, чтобы затруднить механическую разделку кабеля и воспрепятствовать доступу к оптоволокну. Подобные средства защиты широко используются и в традиционных проводных сетях специальной связи. Также перспективным представляется использование пары продольных силовых элементов волоконно-оптического кабеля, которые представляют собой две стальные проволоки, размещенные симметрично в полиэтиленовой оболочке, и используемые для дистанционного питания и контроля датчиков, установленных в муфтах, и контроля несанкционированного доступа. Целесообразно также применение комплекта для защиты места сварки, который заполняет место сварки непрозрачным затвердевающим гелем.

Одним из предложенных методов защиты является использование многослойного оптического волокна со специальной структурой отражающих и защитных оболочек. Конструкция такого волокна представляет собой многослойную структуру с одномодовой сердцевиной. Подбранное соотношение коэффициентов преломления слоев позволяет передавать по кольцевому направляющему слою многомодовый контрольный шумовой оптический сигнал. Связь между контрольным и информационным оптическими сигналами в нормальном состоянии отсутствует. Кольцевая защита позволяет также снизить уровень излучения информационного оптического сигнала через боковую поверхность ОВ (посредством мод утечки, возникающих на изгибах волокна различных участков линии связи). Попытки проникнуть к сердцевине обнаруживаются по изменению уровня контрольного (шумового) сигнала или по смещению его с информационным сигналом. Место несанкционированного доступа определяется с высокой точностью с помощью рефлектометра.

Также проводятся исследования, связанные с мониторингом «горячих» волокон и разработкой различных устройств контроля пара-

метров оптических сигналов на выходе и отраженных оптических сигналов на входе оптоволоконна.

Основой системы фиксации несанкционированного доступа является система диагностики состояния (СДС) оптического тракта. СДС можно построить с анализом либо прошедшего через оптический тракт сигнала, либо отраженного сигнала (рефлектометрические СДС).

СДС с анализом прошедшего сигнала является наиболее простой диагностической системой. На приемной части ВОЛС анализируется прошедший сигнал. При несанкционированном доступе происходит изменение сигнала, это изменение фиксируется и передается в блок управления ВОЛС. При использовании анализатора коэффициента ошибок на приемном модуле ВОЛС СДС реализуется при минимальных изменениях аппаратуры ВОЛС, так как практически все необходимые модули имеются в составе аппаратуры ВОЛС. Недостатками являются относительно низкая чувствительность к изменениям сигнала, отсутствие информации о координате появившейся неоднородности, что не позволяет проводить более тонкий анализ изменений режимов работы ВОЛС.

СДС с анализом отраженного сигнала (рефлектометрические СДС) позволяют в наибольшей степени повысить надежность ВОЛС. Для контроля величины мощности сигнала обратного рассеяния в ОВ в настоящее время используется метод импульсного зондирования, применяемый во всех образцах отечественных и зарубежных рефлектометров. Суть его состоит в том, что в исследуемое ОВ вводится мощный короткий импульс, и затем на этом же конце регистрируется излучение, рассеянное в обратном направлении на различных неоднородностях, по интенсивности которого можно судить о потерях в ОВ, распределенных по его длине на расстоянии до 100–120 км. Начальные рефлектограммы контролируемой линии фиксируются при разных динамических параметрах зондирующего сигнала в памяти компьютера и сравниваются с соответствующими текущими рефлектограммами. Локальное отклонение рефлектограммы более чем на 0,1 дБ свидетельствует о вероятности попытки несанкционированного доступа к ОВ в данной точке тракта.

Основными недостатками СДС с анализом отраженного сигнала на основе метода импульсной рефлектометрии являются следующие:

- при высоком разрешении по длине оптического тракта (что

имеет важное значение для обнаружения локальных неоднородностей при фиксации попытки несанкционированного доступа) значительно снижается динамический диапазон рефлектометров и уменьшается контролируемый участок ВОЛС;

- мощные зондирующие импульсы затрудняют проведение контроля оптического тракта во время передачи информации, что снижает возможности СДС, либо усложняет и удорожает систему диагностики;

- источники мощных зондирующих импульсов имеют ресурс, недостаточный для длительного непрерывного контроля ВОЛС;

- специализированные источники зондирующего оптического излучения, широкополосная и быстродействующая аппаратура приемного блока рефлектометров значительно удорожает СДС.

Также необходимо использовать средства криптографической защиты информации, передаваемой по ВОЛС. Для криптографической защиты следует выбрать средства, которые не вносят существенных временных задержек при криптографическом преобразовании передаваемой/принимаемой информации и обеспечивают шифрование/расшифровку для всего диапазона скоростей передачи данных, характерного для каналов SONET/SDH. Под термином «шифрование» подразумевается изменение сигнала сообщения для того, чтобы сделать его непонятным для случайного наблюдателя (преступника), который воспримет его как случайный набор символов. Дешифрование – это процесс, обратный шифрованию. Он подразумевает изменение зашифрованного сообщения таким образом, чтобы вернуться кначальному понятному сообщению.

Существуют следующие основные криптографические методы защиты:

- основанный на использовании кодового зашумления передаваемых сигналов. При реализации этого метода применяются специально подобранные в соответствии с требуемой скоростью передачи коды, размножающие ошибки. Даже при небольшом понижении оптической мощности, вызванном подключением устройства съема информации к ОВ, в цифровом сигнале на выходе ВОЛС резко возрастает коэффициент ошибок, что достаточно просто зарегистрировать средствами контроля ВОЛС;

- основанный на использовании пары разнознаковых компенсато-

ров дисперсии на ВОЛС. Первый компенсатор вводит в линию диспергированный сигнал, а на приемном конце второй компенсатор восстанавливает форму переданного сигнала;

– использование режима динамического (детерминированного) хаоса, который позволяет обеспечить передачу информации с псевдохаотически изменяющимися частотами и амплитудой несущей. В результате выходной сигнал внешне является шумоподобным, что затрудняет расшифровку;

– квантовой криптографии – соединяют достижения криптографической науки с квантовой механикой и квантовой статистикой. Они потенциально обеспечивают высокую степень защиты от перехвата информации на линии связи за счет передачи данных в виде отдельных фотонов, поскольку неразрушающее измерение их квантовых состояний в канале связи перехватчиком невозможно, а факт перехвата фотонов из канала может быть выявлен по изменению вероятностных характеристик последовательности фотонов.

Контрольные вопросы

1 Назначение системы обеспечения информационной безопасности.

2 Методы защиты линий связи, систем передачи и информации от несанкционированного доступа.

15 КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ КАНАЛОВ И ТРАКТОВ

15.1 Общие сведения

Устройства ЛАЦ должны обеспечивать бесперебойность и высокое качество всех видов связи, возможность быстрого и точного определения мест повреждений в линейном тракте систем передачи, в отдельных элементах оборудования и в цепях, введенных в ЛАЦ, возможность быстрого переключения и замены цепей, аппаратуры и каналов связи, правильную организацию всякого рода профилактических проверок, испытаний, регулировок и периодических измерений цепей, оборудования каналов и трактов передачи.

Методы контроля и измерения ВОК и ВОЛП во многом определяются местом и целью их проведения, а также контролируемыми и измеряемыми параметрами. При лабораторных и заводских измерениях, как правило, определяются паспортные данные ВОК и ВОСП с помощью специализированной аппаратуры. При этом контролирует-

ся большое число параметров в зависимости от различных факторов: длины волны, температуры, механических и климатических воздействий, условий производства и эксплуатации и др.

Измерения в процессе строительства и монтажа ВОК и ВОСП, а также приемосдаточных испытаний проводятся при передаче их в эксплуатацию по специально разработанным методам и ограничиваются обычно двумя-тремя параметрами.

Эксплуатационные измерения проводят, во-первых, с целью контроля и управления работой ВОЛП и, во-вторых, для определения характера и места повреждений и аварий линейного тракта.

Для измерения оптических характеристик и параметров ВОК и линейных трактов ВОЛП в настоящее время разработано и применяется в различных условиях большое число методов измерений и измерительных приборов (приложение А).

15.2 Измерение оптической мощности

Измерение оптической мощности осуществляется на всех стадиях производства оптического волокна, строительства, монтажа и эксплуатации ВОК и ВОЛП.

Различают измерения абсолютной и относительной оптической мощности. В первом случае мощность выражается в единицах мощности (в ваттах), а во втором – в логарифмических единицах по отношению к мощности 1 мВт.

Для измерения оптической мощности используют специальный прибор – измеритель мощности (оптический ваттметр).

Сигнальный фототок с выхода фотодетектора усиливается и поступает на вход электронного осциллографа (ЭО), на экране которого можно наблюдать сигнал, пропорциональный мгновенному значению измеряемой мощности. Для получения результата измерения в цифровой форме используется аналого-цифровой преобразователь и цифровое устройство отображения мощности (уровня) сигналов в децибелах.

Для расширения функциональных возможностей измеряемой оптической мощности их обычно дополняют источником излучения, что позволяет использовать его для измерения потерь (затухания). Прибор, в котором используется пара: источник излучения – измеритель оптической мощности, называется **оптическим тестером** или **измерителем оптических потерь**. Измерением оптической мощно-

сти на входе $P(0)$ и выходе $P(L)$ оптического волокна можно определить его затухание.

15.3 Измерение затухания ВОК

Наиболее важными для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) являются измерения параметров оптических волокон, мест сопряжения кабелей, возможных неоднородностей кабеля. При эксплуатации ВОК особое значение должно уделяться тому, чтобы ОВ в кабелях не повреждалось из-за воздействия факторов окружающей среды, таких как температурные перепады, механические нагрузки и диффузия влаги.

Основным ограничением для передачи информации по волоконно-оптической линии связи является затухание оптического сигнала по мере его распространения по волокну. Так как рассеяние в ОВ обуславливается флуктуациями плотности (неоднородностями) с размерами, которые, как правило, меньше длины волны света, то для объяснения этого процесса используется закон рассеяния Рэлея. Он гласит, что по мере увеличения длины волны λ потери из-за рассеяния a связаны соотношением $a = \lambda^{-4}$. Рэлеевское рассеяние является основной причиной потерь, имеющих место в волокне. На более длинных световых волнах рассеяние меньше, чем на более коротких; так, например, свет на длине волны 1550 нм теряет из-за рэлеевского рассеяния от 0,2 до 0,3 дБ на километр (дБ/км), в то время как на длине волны 850 нм – от 4,0 до 6,0 дБ/км. Имеющие более высокую плотность примеси также увеличивают рассеяние и, следовательно, повышают уровень удельного затухания.

Затухание ОВ длиной L определяется выражением

$$a = 10 \log \frac{P(0)}{P(L)},$$

где $P(0)$ – мощность света направляемых мод, введенная в ОВ;

$P(L)$ – мощность света, оставшаяся на расстоянии L от начала.

В установившемся состоянии мощность P направляемого света уменьшается экспоненциально по мере увеличения длины L .

Коэффициент затухания α позволяет оценить качество волокна с точки зрения потерь, он показывает затухание волокна на единицу длины в 1 км:

$$\alpha = \frac{a}{L},$$

где a – затухание оптического волокна длиной L , дБ;
 L – длина оптического волокна, км.

Некоторая часть световой энергии поглощается, а другая уходит из волокна наружу на дефектах, возникающих в стекле при чрезмерных изгибах волокна. Если световой энергии потеряно очень много, то сигнал может оказаться слишком слабым, чтобы приемник на дальнем конце мог различить в нем отдельные импульсы. В этом случае на передаче для компенсации чрезмерного затухания придется увеличить выходную мощность передатчика, повысить чувствительность приемника или уменьшить расстояние между ними.

Затухание можно измерить несколькими методами, отличающимися технологией калибровки и точностью измерения. Для выполнения измерения требуются стабилизированный источник излучения (*Stabilized Light Source* – SLS) и измеритель оптической мощности (*Optical Power Meter* – OPM), представленные на рисунке 15.1. Задача заключается в определении разности между мощностями сигналов, поданного в линию и полученного на ее выходе. Следует иметь в виду, что из-за различия условий распространения излучения в каждом направлении измерение необходимо выполнять в обоих направлениях на участках регенерации.

В соответствии с Рекомендацией МСЭ-Т различают три основных метода измерения затухания: обрыва, вносимых потерь и обратного рассеяния.

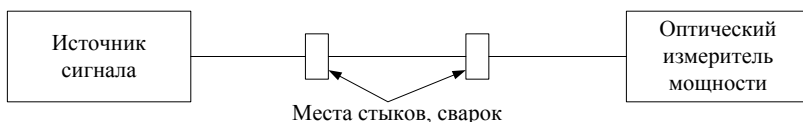


Рисунок 15.1 – Схема измерения затухания

15.4 Методы измерения затухания с использованием проходящего света (метод обрыва)

При этих методах свет вводится в начале ОВ (со стороны передатчика), затем проходит через него и измеряется на конце ОВ (со

стороны приемника). Существуют два способа выполнения измерений по методике с использованием проходящего света: метод обрыва и метод вносимых потерь.

Метод обрыва относится к группе методов разрушающего контроля, имеет высокую точность, применяется чаще всего в лабораторных исследованиях при производстве ВОК и рекомендуется для измерений на коротких оптических волокнах. При данном методе (рисунок 15.2) определяется световая мощность в двух точках ОВ L_1 и L_2 . Сначала измеряется световая мощность P на конце в точке L_2 (км). Затем на передающем конце отрезают фрагмент волокна длиной 1–1,5 м (L_1), скалывают его конец и с помощью адаптера измеряют уровень сигнала на волокне. Уровень в точке L_1 принимают за входной. Разность двух уровней дает искомое значение затухания.

Коэффициент затухания α , дБ/км, ОВ рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)},$$

величина затухания определится выражением $\alpha = p_{L1} - p_{L2}$.

Недостаток этого метода заключается в необходимости отрезать короткий кусок ОВ, что, например, при использовании волоконно-оптических кабелей с соединителями нецелесообразно. Для увеличения точности измерений рекомендуется провести их несколько раз, а за уровень входного сигнала принять среднее значение. Основным недостатком метода обрыва состоит в том, что при каждом измерении происходит потеря 1–1,5 м волокна.

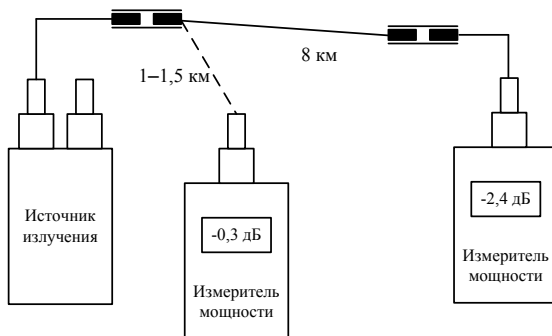


Рисунок 15.2 – Схема измерения затухания методом обрыва

15.5 Метод вносимых потерь

Оптическими вносимыми потерями называют отношение суммарной мощности оптического излучения $P_{\text{вх}}$ на входных оптических полюсах компонента ВОСП к суммарной мощности $P_{\text{вых}}$ оптического излучения на выходных полюсах компонента ВОСП, выраженное в децибелах. При данном методе измеряется световая мощность на дальнем конце испытуемого ОВ (рисунок 15.3, а), а затем она сравнивается со световой мощностью на конце короткого отрезка световода (рисунок 15.3, б). Такой отрезок ОВ служит эталоном, по которому выполняется калибровка, и должен быть сопоставимым с испытываемым ОВ по структуре и характеристикам.

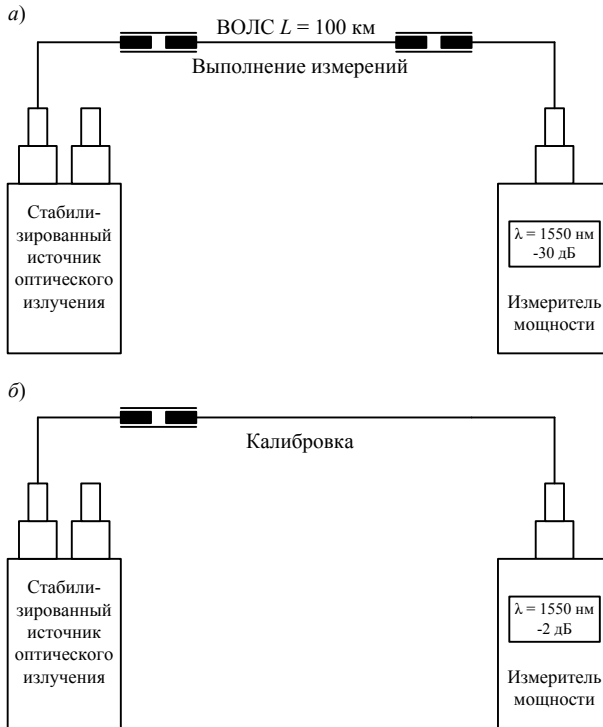


Рисунок 15.3 – Схема измерения затухания методом вносимых потерь

Во время проведения измерений необходимо добиться того, чтобы условия возбуждения для эталонного отрезка были, насколько это

возможно, одинаковыми с условиями ввода для испытуемого отрезка ОВ. Из-за этих ограничений точность и воспроизводимость данного метода менее предпочтительна, чем у метода обрыва. Затухание линии определится выражением $a_{\text{вн}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$. Погрешность этого метода выше, чем метода обрыва, однако она приемлема только для испытанных регенерационных участков.

При методе вносимых потерь можно использовать стабилизированный источник оптического сигнала и оптический измеритель мощности либо два анализатора затухания (*Optical Loss Test Set – OLTs*). Анализатор затухания представляет собой комбинацию оптического измерителя мощности и источника оптического сигнала. Использование двух анализаторов затухания позволяет провести измерения, попеременно меняя направление, используя сначала источник в точке А, а затем – в точке В.

15.6 Измерение параметров ВОК методом обратного рассеяния

При методе обратного рассеяния свет вводится и выводится на одном конце ОВ (рисунок 15.4). Дополнительно можно получить информацию о процессе затухания вдоль ОВ. В основу метода положено рэлеевское рассеяние.

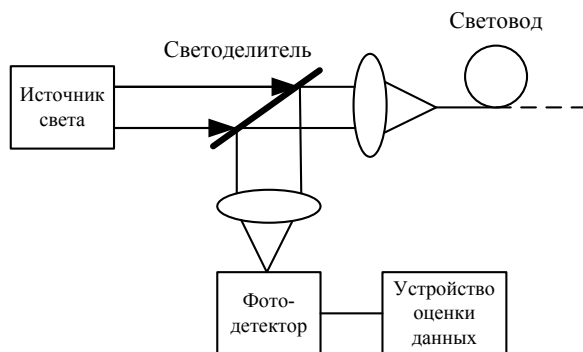


Рисунок 15.4 – Схема измерения затухания методом обратного рассеяния

Основная часть световой мощности распространяется в направлении «вперед», а небольшая ее часть рассеивается назад к передатчику. Эта мощность обратного рассеяния по мере прохождения по волоконному световоду также претерпевает затухание. Оставшаяся часть мощности с помощью светоделителя, например полупрозрач-

ного зеркала, расположенного перед ОВ, выводится и измеряется. По этой световой мощности обратного рассеяния и времени прохождения по ОВ можно построить кривую, на которой наглядно видно затухание по всей длине световода (рисунок 15.5). На рисунке цифрами обозначены следующие события: 1 – обратное рассеяние в начале ОВ, 2 – обратное рассеяние в соединителе, 3 – обратное рассеяние в конце ОВ. Прохождение сигнала обратного рассеяния во времени можно легко наблюдать с помощью осциллоскопа.

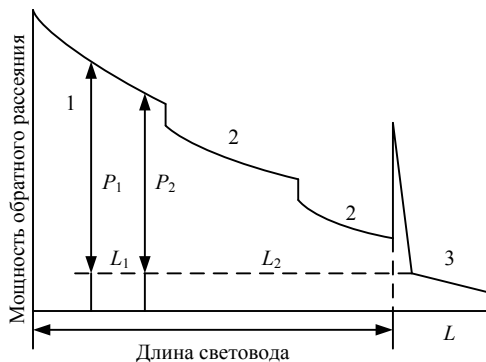


Рисунок 15.5 – Кривая измерений обратного рассеяния

Если коэффициент затухания и коэффициент обратного рассеяния остаются постоянными по всей длине ОВ, то кривая убывает от начала ОВ экспоненциально. Из-за скачка показателя преломления в начале и конце ОВ относительно большая часть световой мощности рассеивается обратно в этих местах, что обуславливает наличие пиков в начале и конце кривой. По разности времени Δt между этими двумя пиками, скорости света в вакууме c_0 и групповому показателю преломления $n_g \sim 1,5$ в стекле сердцевины можно рассчитать длину ОВ:

$$L = \frac{\Delta t c_0}{2 n_g},$$

где L – длина ОВ, км;

Δt – разность времени между пиками начального и конечного импульсов, с;

c_0 – скорость света в вакууме 300 000 км/с;

n_g – действительный групповой показатель преломления стекла сердцевины.

Коэффициент затухания α для любого участка ОВ между точками L_1 , и L_2 , определяется по формуле

$$\alpha = \frac{5}{L_2 - L_1} \lg \frac{P(L_1)}{P(L_2)}.$$

Вследствие того, что свет проходит как вперед, так и назад, в формуле используется коэффициент 5 вместо 10 в аналогичном уравнении для метода светопропускания. Это уравнение имеет силу, исходя из предположения, что коэффициент обратного рассеяния, числовая апертура и диаметр сердцевины остаются неизменными по всей длине ОВ. Если это не обеспечивается, то рекомендуется сделать два измерения на обоих концах ОВ, а результаты усреднить.

Поскольку мощность обратного рассеяния относительно мала, выдвигаются повышенные требования к чувствительности приемника. Для улучшения принимаемого сигнала проводится многократное усреднение отдельных измеренных величин. Измерительные приборы, работающие по принципу обратного рассеяния, называются оптическими рефлектометрами, использующими метод наблюдения за отраженным сигналом. Наряду с измерением коэффициента затухания они позволяют определить местоположение дефектов (изломов) в ОВ, а также проверить оптические потери в соединенных ОВ (скачки затухания из-за разъёмных и неразъёмных соединений). Кроме рэлеевского рассеяния, в основе работы оптического рефлектометра лежит и френелевское отражение.

Всегда, когда свет, распространяющийся в каком-нибудь материале (например, в оптическом волокне), попадает в материал с другой плотностью (например, в воздух), часть световой энергии (до 4 %) отражается назад к источнику света, в то время как остальная световая энергия продолжает распространяться дальше. Резкие изменения плотности материала имеют место на концах волокна, у его обрывов и иногда у стыков. Количество отраженного света зависит от величины изменения плотности материала (которая характеризуется показателем преломления – более высокий показатель преломления означает большую плотность), а также от угла, под которым свет

падает на поверхность раздела между двумя материалами. Это явление называется **френелевским отражением**. Оно используется в оптическом рефлектометре для точного определения мест обрывов волокна.

15.7 Измерение дисперсии

Измерение дисперсии осуществляется на всех этапах изготовления ОВ и ВОК, а также при строительстве и эксплуатации ВОЛП.

Измерение дисперсии может производиться косвенным методом по амплитудно-частотной характеристике ОВ или импульсным методом. В первом случае процесс измерения заключается в подаче на вход измеряемого ОВ различных амплитудно-модулированных сигналов с различными несущими частотами и последующим измерением соответствующего уровня выходного сигнала.

В результате получается зависимость мощности на выходе ОВ от частоты модуляции, т. е. амплитудно-частотная характеристика ОВ. По АХЧ определяется полоса пропускания, в пределах которой неравномерность затухания не превышает 3 дБ. По найденной определяется дисперсия и удельная дисперсия.

Импульсный метод измерения дисперсии сводится к измерению формы импульсов на входе и выходе ОВ, т. е. временных зависимостей сигналов соответственно на входе и выходе ОВ.

Контрольные вопросы

- 1 Измерение затухания ОВ методом обрыва.
- 2 Измерение параметров ОВ методом обратного рассеивания.
- 3 Измерение затухания ОВ методом вносимых потерь.

16 СЛУЖЕБНАЯ СВЯЗЬ ВОЛП

Служебная связь предназначена для обеспечения производственного взаимодействия персонала всех подразделений ВОЛП и других объектов первичной сети связи в процессе технической эксплуатации и обслуживания сети.

В состав служебной связи входят следующие виды связи:

- линейная связь, включающая каналы постанционной и участковой телефонной связи и радиосвязь;
- сетевая связь;
- связь системы управления;

– внутривыроductiveнная связь.

Каналы постанционнoй и участковой служебной связи предназначены для обеспечения служебных телефонных переговоров технического персонала оконечных станций соответственно с линейными участками и оконечными и промежуточными пунктами, в том числе НРП. Для оперативного управления ремонтно-восстановительными работами постанционная и участковая связь обязательно должны дополняться радиосвязью. При технической возможности каналы постанционной и участковой служебной связи могут объединяться.

Сетевая служебная связь предназначена для обеспечения связи технического персонала оконечных и транзитных станций и систем эксплуатации сетевых трактов и каналов ТЧ первичной сети связи. Сетевая служебная связь организуется с помощью выделенных каналов ТЧ и производственных АТС.

Связь системы управления предназначена для обеспечения всех подразделений, входящих в систему управления (центров управления, эксплуатационно-технических цехов и др.) между собой. Организуется связь по каналам ТЧ, существующих АСП и по обходным каналам ВОЛП.

Внутривыроductiveнная связь предназначена для связи инженерно-технического персонала оконечных и промежуточных пунктов низового уровня и организуется с помощью ОбТС.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение служебной связи ВОЛП.
- 2 Виды служебной связи ВОЛП.

17 СЛУЖЕБНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОМЕЩЕНИЯ

17.1 Общие сведения

Служебные технические помещения, как правило, размещаются в специальных домах связи или других производственных зданиях железных дорог и предназначены для размещения технологического оборудования узлов связи. Обычно дома связи располагаются в управлениях и отделениях железных дорог и как исключение – на больших железнодорожных узлах.

В домах связи предусматриваются следующие технические помещения:

- линейно-аппаратные цеха (ЛАЦ) для аппаратуры систем передачи, оперативно-технологической связи, телеграфной каналобразующей аппаратуры и др.;
- узел автоматической коммутации (УАК) дальней автоматической телефонной связи (ДАТС);
- стативная станция автоматической коммутации каналов (СКК) телеграфной связи и передачи данных;
- коммутаторная автоматической станции телеграфной связи и передачи данных;
- аппаратная станции телеграфной связи и передачи данных;
- междугородная телефонная станция ручного способа соединения (РМТС);
- автоматный зал местной автоматической телефонной станции (ЖАТС);
- кроссовая ЖАТС;
- выпрямительных устройств (выпрямительная);
- аккумуляторных батарей (аккумуляторная);
- ввода кабелей в дом связи;
- резервная электростанция;
- компрессорная;
- центра управления ВОЛП;
- производственная лаборатория и контрольно-измерительный пункт (КИП);
- эксплуатационно-технический цех (ЭТЦ).

Допускается совмещенное расположение аппаратуры в одном помещении, например, ЖАТС и автоматного зала, ЖАТС и УАК, электропитающей установки в помещении ЛАЦ или ЖАТС и др.

17.2 Дом связи

Для удобства эксплуатации сетей связи вся аппаратура ВОЛП устанавливается в специальных домах связи, в которых организуют ввод линейных кабелей и создают отдельные цеха (телефонная станция, телеграф, и др.), выполняющие различные функции и услуги. Функции эксплуатации и контроля за аппаратурой систем передачи, испытания и коммутации ВОК и ВОЛП, а также обслуживания аппаратуры систем передачи выполняются цехом, называемым линейно-

аппаратным цехом (ЛАЦ). В дом связи вводятся также линейные кабели (рисунок 17.1).

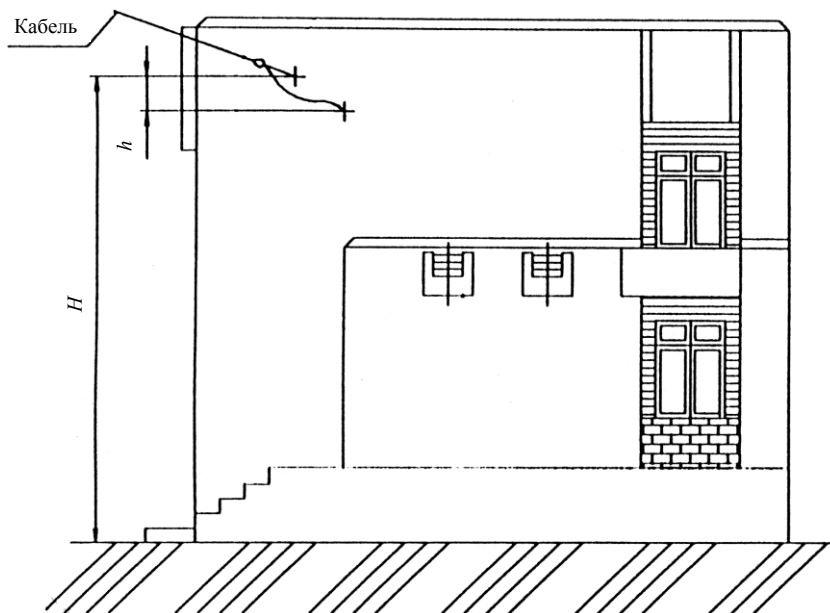


Рисунок 17.1 – Ввод ВОК в дом связи

Ввод ВОК в здание дома связи может быть подземный или воздушный. Кабель должен быть механически защищен внутренним трубопроводом при подземном вводе. Линейные кабели вводятся в здания через специальное помещение – кабельную шахту.

В домах связи и других служебно-технических зданиях и помещениях железнодорожного транспорта предусматривают оборудование для организации следующих сетей связи и сигнализации:

- телефонной общетеchnологической связи (ОБТС);
- радиотрансляционной сети;
- сети электрических часов;
- автоматической охранно-пожарной сигнализации;
- связи оповещения о пожаре.

Здание служебно-технических помещений должны быть каменными или железобетонными. Взаимное расположение помещений должно обеспечивать удобство эксплуатации и экономию кабеля при

монтаже аппаратуры. Площади помещений определяют составом и расположением оборудования с учетом перспектив развития и экономии монтажных и линейных проводов, цепей электропитания и др.

В технических зданиях обязательно применение устройств аварийного электроосвещения и молниезащиты, кондиционирования воздуха, пожарного инвентаря и др. Покрытия полов не должны накапливать статическое электричество. Температурно-влажностные режимы и запыленность воздуха в помещениях должны соответствовать требованиям СНиП и поставщика оборудования.

Важное место в домах связи отводится автоматической охранной сигнализации. Ею оборудуются все помещения, расположенные на первом этаже, помещения кассы, хранения ценных бумаг, дорогостоящей аппаратуры и др.

Автоматической пожарной сигнализацией в домах связи и других служебно-технических зданиях оборудуются: ЛАЗы, контрольно-испытательные пункты, мастерские, электростанции, выпрямительные и др.

В домах связи должны быть оборудованы заземляющие устройства (заземления) или рабоче-защитный контур. Заземления оборудования систем и аппаратуры производятся с целью их нормального функционирования, защиты технического персонала и аппаратуры от опасных и мешающих влияний ЛЭП, контактной сети электрифицированных железных дорог и молний, обеспечения нормальной электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости аппаратуры и систем передачи и др.

Оконечные и обслуживаемые регенерационные пункты ЦСП, в которых используются кабели с металлическими элементами (бронепокров, бронеленты, жилы), цепи дистанционного питания, соединительные линии, использующие землю в качестве одного провода электрической цепи, должны иметь:

- рабоче-защитное заземляющее устройство;
- два измерительных заземляющих устройства.

В случаях, когда в оконечных и регенерационных пунктах земля не используется в качестве одного провода электрической цепи, оборудуют:

- защитное заземляющее устройство;
- два измерительных устройства.

К рабочему заземляющему устройству подключается положительный полюс источника питания телефонной станции, использую-

щему землю в качестве одного провода электрической цепи, а к защитному заземляющему устройству:

- один из полюсов электропитающей установки;
- металлические части шкафов, стивного и коммутаторного оборудования;
- электромагнитные экраны аппаратуры и кабелей;
- металлические оболочки кабелей, элементы схем защиты от опасных и мешающих влияний, молниеотводы;
- металлические части силового оборудования (щиты и панели для ввода и распределения переменного тока, шкафы и щиты питающей установки);
- щит автоматики, корпус дизель-генератора резервной электростанции и др.), которые подлежат заземлению при изолированной нейтрали и занулению при глухозаземленной нейтрали питающей сети переменного напряжения;
- металлические трубы водопровода и центрального отопления, все другие металлические конструкции внутри здания;
- выводы источника однофазного переменного тока, нейтраль трансформаторов силовой трансформаторной подстанции и резервной электростанции, питающей оборудование, установленное в доме связи.

При дистанционном питании по схеме «провод – провод» на всех необслуживаемых регенерационных пунктах в зависимости от сопротивления грунта (более или менее 20 Ом) оборудуют объединенное защитное заземляющее устройство и два измерительных заземляющих устройства или защитное, линейно-защитное и измерительное заземляющее устройство.

17.3 Линейно-аппаратный цех

Линейно-аппаратный цех должен располагаться в непосредственной близости от помещений, где осуществляется ввод электрических кабелей и ВОК, располагаются АТС, МТС, ДАТС и др. Это позволяет сократить длину распределительных кабелей.

В ЛАЦ, кроме основной аппаратуры АСП и ЦСП, устанавливается водно-коммутационная аппаратура, коммутационно-испытательная и электропитающая аппаратура и др.

Водно-коммутационная аппаратура предназначена для защиты и коммутации физических цепей, подключения оптических и электри-

ческих кабелей, испытания и переключения цепей электрических кабелей и ВОК.

Коммутационно-испытательная аппаратура предназначена для предоставления пользователям трактов со скоростью передачи 2048 кбит/с, 2- и 4-проводных каналов ТЧ, переключения каналов и трактов при повреждениях, проведения измерений при настройке и регулировке ВОЛП.

Аппаратура в ЛАЦ устанавливается в специальных шкафах, которые крепятся к полу, или унифицированных стойках, которые крепятся к металлическим конструкциям – кабельростам. Кабельрост размещается над стойками и предназначен для укладки линейных цепей, межстоечных соединений, цепей для подключения, а также для цепей токораспределительной проводки, с целью уменьшения электромагнитного влияния цепей электропитания на цепи связи, размещаются на отдельном кабельросте.

17.4 Линии передачи и коммутационные станции

В существующих узлах связи необходимо обеспечить как работу имеющегося аналогового систем и оборудования, связи, так и устанавливаемого нового цифрового оборудования. При этом должна быть предусмотрена защита обслуживающего персонала систем и оборудования от возникающих перенапряжений, электростатических напряжений и электрических разрядов молний.

К заземляющим устройствам в этом случае подключаются все указанные выше устройства, оборудования и системы передачи.

Для достижения указанных целей заземляющие устройства (заземления) должны соответствовать требованиям и Рекомендациям МСЭ-Т. Величина сопротивлений заземлений должна соответствовать нормам.

Для аппаратуры ВОЛП и цифровых коммутационных станций сопротивление заземляющих устройств не должно превышать 4 Ом.

Сопротивление защитного или рабоче-защитного заземляющего устройства должно быть обеспечено с учетом использования естественных заземлителей (проложенные под землей металлические трубы, металлические конструкции, арматура зданий и их бетонных фундаментов и другое, за исключением трубопроводов горючих и взрывоопасных смесей, канализации, центрального отопления и бытового водопровода, расположенных вне служебно-технических помещений).

В случае невозможности использования естественных заземлителей необходимо оборудовать искусственные заземлители. Тип заземлителя выбирают после изысканий, расчета количества заземлителей и определения затрат с учетом грунта (песок, скалы, вечная мерзлота и др.).

Вводы от каждого контура заземляющего устройства в служебное техническое здание выполняются:

- от защитного или рабочего защитного – двумя стальными шинами сечением не менее 50 мм, присоединенными сваркой к контуру наружного заземления в разных местах;

- от рабочего и измерительного – силовыми небронированными кабелями с алюминиевой жилой сечением не менее 25 и 6 мм соответственно.

Все вводы подаются на главную шину заземления, где соединяются параллельно с помощью болтов в соответствии с требованиями ГОСТ-Р 50571.10–96. На период измерения сопротивления заземляющих контуров вводы разъединяются.

В качестве главной шины заземления рекомендуется медная шина (полоса) сечением не менее 50 мм, длиной 1,0 м. Главная шина заземления должна располагаться вблизи ввода шин (кабелей) от наружного контура заземления, как можно ближе к устройствам ввода и распределения переменного тока и кабелей связи.

В подземных необслуживаемых регенерационных пунктах от контуров рабочего, защитного, линейно-защитного и измерительного заземлителей, а также от электродов протекторной защиты предусматривается прокладка заземляющих проводников в соответствии с типовыми проектными решениями для соответствующих систем передачи.

Металлические бронепокровы линейной стороны ВОК подключаются медными проводами сечением не менее 4 мм к главной шине заземления.

Для возможности контроля изолирующих шланговых покровов ВОК предусмотрена возможность временного электрического отключения указанного провода от главной шины заземления (установка щитка КИП или съемных перемычек).

Особые меры в служебных технических зданиях и помещениях следует принимать по оборудованию системы выравнивания потенциалов.

18 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

На экономические показатели железных дорог или производственного объединения существенное влияние оказывают множество факторов, среди которых важное значение принадлежит средствам автоматики, телемеханики и связи, среди которых можно выделить совершенствование систем передачи информации, модернизации оборудования, организации и технологии производства и др.

Основным источником экономической эффективности от создания ВОЛП является улучшение показателей управляемой транспортной системы – железных дорог, предприятий, организаций и др. и предоставлением пользователям ДЦСС более качественных услуг связи в сравнении с предложениями операторов других сетей, в цену которой входит первоначальная себестоимость строительства удельного объемного показателя ВОЛП (например, одного км линии) и добавленная стоимость в виде ежегодных эксплуатационных затрат на его техническое содержание в пределах нормируемых параметров. Эксплуатационные затраты на техническое содержание ВОЛП должны быть минимальными и при этом обеспечивать выполнение заданных технических параметров сети на протяжении всего ее жизненного цикла, то есть в течение не менее 25 лет. Поэтому основной проблемой становится техническое обслуживание ДЦСС, обеспечение ее бесперебойного функционирования при заданных показателях качества и надежности. Это связано с тем, что ДЦСС входит в систему управления перевозочным процессом, где полностью должны быть исключены случаи потери управления и, следовательно, потери прибыли.

Дополнительный экономический эффект может быть достигнут заменой транспортных услуг телекоммуникационными (телевидение, телеобщение, телеконференции, телеработа и др.). По оценкам американских экспертов, телекоммуникациями можно заменить 20–30 % поездок, что позволяет ежегодно экономить на транспортных расходах около 20 млрд долларов.

Контрольные вопросы

- 1 Экономическая эффективность ВОЛП.
- 2 Пути повышения экономической эффективности ВОЛП.
- 3 Основной и дополнительный экономический эффект ДЦСС.

19 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

История становления и развития электрической связи на железнодорожном транспорте показывает, что в прошлом в большинстве случаев эти процессы носили **эволюционный характер** и обуславливались постепенным внедрением новых средств связи с учетом их влияния на эффективность технологических процессов железнодорожного транспорта.

Сейчас ситуация существенно изменилась. Мировое сообщество вступило в XXI век и новое тысячелетие. В XXI веке намечается переход к **глобальному информационному обществу**, в котором роль и значение информации будет неизмеримо возрастать.

Технической основой глобального информационного общества является **глобальная информационная инфраструктура**, включающая в себя межгосударственные (региональные), национальные, внутригосударственные (ведомственные) и другие информационные инфраструктуры. В свою очередь предполагается, что каждая информационная инфраструктура будет состоять из больших сетей связи (телекоммуникационный комплекс) и разнообразного информационного оборудования (информационный комплекс).

С увеличением числа и повышением качества предоставляемых услуг произошло сращивание телекоммуникационного и телеинформационного комплексов связи в единый **инфокоммуникационный комплекс**, что и послужило основой глобализации связи и информатизации мирового сообщества.

Переход к глобальной информационной инфраструктуре потребует не только дальнейшего количественного роста средств связи (каналов и групповых трактов, комплектов коммутационного оборудования, абонентских и соединительных линий, терминальных устройств и т. п.), но и их качественного изменения и структурной перестройки, совершенствования управления сетью связи и технического обслуживания.

Вхождение РЖД в глобальное информационное общество и присоединение ее к глобальной информационной инфраструктуре оказывают свое влияние на процессы развития инфокоммуникаций на Белорусской железной дороге и железных дорогах других стран СНГ.

К факторам, определяющим прогресс в этой области, в первую очередь следует отнести развитие микроэлектронной индустрии и

вычислительной техники, а также колоссальные успехи в инфокоммуникационных технологиях. **Инфокоммуникационные технологии** развивались параллельно и взаимосвязано с возможностями каналов связи (от аналоговых к высокоскоростным цифровым волоконно-оптическим линиям связи) и компьютеризацией общества.

В числе основных составляющих развития инфокоммуникационных технологий следует отметить:

- **сети передачи данных** с коммутацией пакетов, использующих виртуальные соединения (X.25);
- **локальные вычислительные сети** (*Ethernet, Token Ring*);
- **цифровые сети** интегрального обслуживания (узкополосные, а затем широкополосные);
- **высокоскоростные локальные сети** (*Fast Ethernet, FDDI* для синхронной передачи речевой и видеoinформации);
- **высокоскоростные распределенные сети** (*Frame Relay, ATM*);
- **информационные супермагистралю.**

Наиболее впечатляющие успехи инфотелекоммуникационных технологий наблюдаются в последние 10–15 лет. В их числе можно назвать технологии по рекомендации Международного союза электросвязи X.25, TCP/IP, ATM. Использование **оптоволокна** в телекоммуникационных сетях связи обеспечило практически **неограниченные скорости** передачи информации, **высокое качество** и **надежность** сетей. Компании – владельцы телекоммуникационных сетей используют технологию цифровой связи на оптоволокне, чтобы перестроить свои сети на всех уровнях иерархии управления. В этот процесс включились и железные дороги стран СНГ.

Широкое использование оптоволокна потребовало разработки новых технологий цифровой передачи сигналов. Наиболее удачной оказалась **технология синхронной цифровой иерархии SDH/СЦИ**, которая задает стандарты для передачи данных на скоростях до 2,4 Гбит/с с возможным увеличением до 10 Гбит/с, а также **волнового уплотнения WDM** с практически неограниченными возможностями увеличения пропускной способности ВОЛП.

Значительными успехами последних лет явились достижения в области **мобильных и беспроводных систем связи** (особенно спут-

никовых и сотовых), которые обеспечивают доступ пользователей к телекоммуникационным сетям из любой точки, в том числе и во время движения.

Наиболее мощной и динамически развивающейся инфокоммуникационной сетью является **Интернет**. За сравнительно короткое время эта сеть сделала скачек от ведомственной сети к глобальной инфокоммуникационной инфраструктуре. Сегодня Интернет представляет собой транснациональную инфраструктуру, которая объединяет большое число различных компьютерных сетей, работающих по самым разнообразным протоколам, связывающим компьютеры различных типов и обеспечивающим передачу данных в различных физических средах: электрических кабелях, волоконно-оптических кабелях, радио и спутниковых каналах.

На основе Интернет внедряется **электронная почта**, которая получила широкое распространение в мире бизнеса, науки, образования, а также новая технология передачи телефонных сообщений (**IP-телефония**).

В ближайшие годы основными направлениям скачка инфокоммуникационных технологий будут:

- **увеличение скорости** передачи информации, обусловленное возрастающими возможностями ВОЛС и всеобщим использованием оптических каналов;
- **интеллектуализация сетей** передачи информации;
- **увеличение числа и мобильности** пользователей в связи с удешевлением и миниатюризацией оконечных средств (терминалов) и применением техники беспроводной связи.

Высокие скорости необходимы для передачи изображений, в том числе телевизионных, а также для интеграции различных видов информации в контексте мультимедиа, взаимосвязи локальных, ведомственных, корпоративных и глобальных сетей.

Интеллектуальность сетей позволяет увеличить их гибкость, возможности и надежность, а также упростить управление сетями, расти благодаря использованию микроэлектроники и применению программного обеспечения в каждом сетевом устройстве.

Увеличение числа и мобильности пользователей с применением спутниковых и беспроводных средств способствуют широкому распространению и мобильности оконечных устройств (терминалов). В некоторых странах число мобильных пользователей превысило

число фиксированных связей. Некоторые проекты предусматривают на основе спутниковых систем создание всемирных глобальных сетей связи, систем навигации и др.

Для повышения эффективности функционирования цифровых систем связи, расширения перечня и качества услуг в настоящее время общемировой тенденцией развития систем телекоммуникаций является переход к **мультисервисным сетям**, построенным в соответствии с концепцией сети связи следующего поколения NGN (*Next Generation Network*). В действующих сетях железных дорог созданы определенные технические предпосылки для внедрения телекоммуникационных технологий, базирующихся на концепции NGN.

В числе основных технологий, которые в ближайшие годы будут оказывать решающее воздействие на развитие инфокоммуникаций, следует назвать:

- **оптические технологии**, обеспечивающие увеличение скорости передачи информации, удешевление доступа к сети и, следовательно, увеличение числа пользователей;

- **широкополосные каналы**, позволяющие передавать разнородную информацию по одному и тому же каналу (тракту) и, как следствие, повышающие быстродействие и интеллектуальность сети;

- единую **технологию мультиплексирования и коммутации (АТМ)**, повышающую интеллектуальность сети;

- **универсальный доступ** к услугам глобальной сети Интернет.

Современное состояние технологий определяется в основном развитием рыночных отношений в странах СНГ, которые вызвали резкое увеличение потребности в надежно и своевременно доставляемой информации. Как следствие этого примерно с 1995 года полностью определился интерес к формированию региональных информационно-телекоммуникационных компьютерных систем и сетей.

На железнодорожном транспорте вершиной таких систем и сетей явилась магистральная цифровая сеть связи (МЦСС) РЖД, созданная ЗАО «ТрансТелеКом» на базе **волоконно-оптического кабеля**. Технические показатели сети: скорость передачи информации 155–2500 Мбит/с и более, вероятность ошибки менее 10^{-9} , коэффициент технической готовности более 0,999, время восстановления менее 5 ч.

Следует отметить, что технические возможности МЦСС

уникальны: она создана с использованием новейших телекоммуникационных технологий. Каналоемкость ее такова, что позволяет полностью решить проблемы со связью не только железным дорогам, но и всем, кто связан с транспортной системой России: морскому, речному, автомобильному, авиационному и другим видам транспорта, а также таможенникам, пограничникам, медикам и др., всем, кто составляет экономику страны. МЦСС позволяет значительно повысить эффективность работы всех транспортных компаний страны, внедрить новые прогрессивные информационные технологии. Отметим также, что сеть проходит вдоль железных дорог и соединяет между собой все города. Сетью могут пользоваться не только транспортные организации и предприятия, но и население городов и населенных пунктов, прилегающих к железной дороге. Поэтому ДЦСС является сетью связи двойного использования: **технологического и коммерческого**. В этом также большое ее общегосударственное значение.

Практика строительства инфокоммуникационных сетей железнодорожного транспорта двойного использования давно уже распространена в США, Европе и Азии. Это позволяет использовать уже готовую инфраструктуру железнодорожного транспорта: земельные полосы отвода, опоры линий автоблокировки и контактной сети, здания и сооружения и др.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ И ИСПОЛЬЗОВАННОЙ 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 **Алишев, Я. В.** Многоканальные системы оптического диапазона / Я. В. Алишев. – Минск : Выш. шк., 1989. – 283 с.
- 4 **Багуц, В. П.** Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. П. Багуц, Н. П. Ковалев, А. М. Костроминов. – М. : Транспорт, 1991. – 286 с.
- 5 **Баркун, М. А.** Цифровые автоматические телефонные станции / М. А. Баркун. – Минск : Выш. шк., 1990. – 192 с.
- 6 **Буй, П. М.** Метод и средства оценки эффективности устройств аутентификации в сетях телекоммуникаций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / П. М. Буй. – Минск, 2008. – 176 с.
- 7 **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.
- 8 **Воронин, В. С.** Основные направления развития телекоммуникационной сети связи МПС / В. С. Воронин // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С. 4–6.
- 9 **Здоровцов, И. А.** Магистральные цифровые сети связи на железных дорогах / И. А. Здоровцов, Н. Ф. Семенюта. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 64 с.
- 10 **Здоровцов, И. А.** ТрансТелеКом: история и современность / И. А. Здоровцов. – М. : Альпина Мбруте Бук, 2007. – 266 с.
- 11 **Здоровцов, И. А.** О некоторых целевых проблемах инфокоммуникационного обеспечения транспортной отрасли / И. А. Здоровцов // ВКСС Connect. – 2005. – № 6. – С. 20–34.
- 12 **Здоровцов, И. А.** Системы оптической связи / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1982. – № 5. – С. 41–44.
- 13 **Здоровцов, И. А.** Магистральная цифровая сеть связи российских железных дорог / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов // Веснік сувязі. – 2003. – № 5. – С. 45–49.
- 14 **Здоровцов, И. А.** Основы теории надежности волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта / И. А. Здоровцов, В. Ю. Королев. – М. : МАКС Пресс, 2004. – 308 с.
- 15 **Иоргачев, Д. В.** Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. – М. : Эко-Трендз, 2002. – 283 с.
- 16 **Инфокоммуникации Российских железных дорог. Состояние и перспективы развития.** – М. : МАС, 2006. – 192 с.
- 17 **Клюев, Л. Л.** Теория электрической связи / Л. Л. Клюев. – Минск. : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
- 18 **Кудряшов, В. А.** Передача дискретной информации на железнодорожном транспорте / В. А. Кудряшов, Н. Ф. Семенюта. – М. : УМО МПС, 1999. – 345 с.

- 19 **Многоканальная связь на железнодорожном транспорте** / под ред. В. Л. Тюрина. – М.: Транспорт, 1992. – 431 с.
- 20 **Информатизация на железнодорожном транспорте. История и современность** / В. С. Ноговицын [и др.]. – М. : Вече, 2005. – 720 с.
- 21 **НТИ ЦТКС–ФЖД-2002** Нормы технологического проектирования телекоммуникационных сетей на федеральном железнодорожном транспорте. – М. : Трансиздат, 2002. – 236 с.
- 22 **Портнов, Э. Л.** Оптические кабели связи: Конструкции и характеристики / Э. Л. Портнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 232 с.
- 23 **Ракк, М. А.** Измерения в технике связи : учеб. / М. А. Ракк – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 312 с.
- 24 **Семенюта, Н. Ф.** Волоконно-оптические кабельные системы связи / Н. Ф. Семенюта. – Гомель : БелИИЖТ, 1982. – 24 с.
- 25 **Семенюта, Н. Ф.** Волоконно-оптические линии связи / Н. Ф. Семенюта, В. Е. Малявко, В. С. Смолянчук. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – 48 с.
- 26 **Семенюта, Н. Ф.** Волоконно-оптические кабели / Н. Ф. Семенюта, А. А. Котов // Автоматика, информатика и связь. – 1999. – № 5. – С. 12–16.
- 27 **Семенюта, Н. Ф.** Новый этап развития магистральных цифровых сетей связи / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов // Веснік сувязі. – 2004. – № 1. – С. 32–34.
- 28 **Семенюта, Н. Ф.** История электрической связи на железнодорожном транспорте / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 324 с.
- 29 **Семенюта, Н. Ф.** Проблемы надежности волоконно-оптических линий передачи / Н. Ф. Семенюта, И. А. Здоровцов, Д. Н. Шевченко // Веснік сувязі. – 2009. – № 4. – С. 37–40.
- 30 **Слепов, Н. Н.** Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2000. – 488 с.
- 31 **Убайдуллаев, Р. Р.** Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
- 32 **Шмалько, А. В.** Цифровые сети связи: основы планирования и построения / А. В. Шмалько. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 282 с.
- 33 **Фриман, Р.** Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003. – 440 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)
Состав измерительного оборудования

| Наименование | Количество | Фирма-изготовитель |
|---|------------|--------------------|
| Оптические телефоны PHOTOM-450 с устройством бокового ввода/вывода | 1 | Photom |
| Идентификатор канала FI 720С | 1 | GN Nettest |
| Оптический рефлектометр СМА-4000 (1310/1550n, 36/34 dB) с оптическим ваттметром | 1 | GN Nettest |
| Оптический тестер GN-6025/A50 (1310/1550nm) с лазерным источником | 1 | GN Nettest |
| Анализатор цифрового потока 2 Мбит/с, 64 кбит/с, HP E7580A | 1 | HP |
| Ноутбук | 1 | Toshiba |
| Компенсационная катушка | 1 | Corning |
| Адаптер типа FC | 4 | EMIT |
| Розетки FC-SM | 4 | FOCI |
| Шнуры световодные (Pig tail), 5 м | 4 | АО "БОТ" |
| Шнуры световодные (Pach cord), 5 м | 8 | АО "БОТ" |
| Соединители Fiber lock | 60 | ЗМ |
| Прецизионный инструмент | 1 | REHAU |
| Электростанция переносная (2,8–3,5 кВт) | 1 | GENERAC (HONDA) |
| Носимые радиостанции «Motorola» GP-340 | 4 | США |
| Телефонный аппарат ТА-57 | 1 | РФ |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1 ЛИНИИ СВЯЗИ И СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ | 8 |
| 1.1 Общие сведения | 8 |
| 1.2 Линии связи | 9 |
| 1.3 Аналоговые системы передачи | 11 |
| 1.4 Цифровые системы передачи | 17 |
| 1.5 Волоконно-оптические системы передачи | 18 |
| 1.6 Системы спутниковой связи | 21 |
| 1.7 Переходный период линий и систем передачи железных дорог | 23 |
| 2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ | 26 |
| 2.1 Общие сведения | 26 |
| 2.2 Принцип передачи оптических сигналов по волокну | 28 |
| 2.3 Принципы построения волоконно-оптической линии связи | 29 |
| 3 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО | 32 |
| 3.1 Общие сведения | 32 |
| 3.2 Передача оптических сигналов по волокну | 34 |
| 3.3 Многомодовое оптическое волокно | 36 |
| 3.4 Одномодовое оптическое волокно | 36 |
| 3.5 Технология изготовления оптического волокна | 38 |
| 4 ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН | 41 |
| 4.1 Распространение оптических сигналов по волокну | 41 |
| 4.2 Затухание оптических сигналов | 48 |
| 4.3 Дисперсия оптических сигналов | 52 |
| 5 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ | 56 |
| 5.1 Основные конструкции и элементы оптических кабелей | 56 |
| 5.2 Классификация волоконно-оптических кабелей | 57 |
| 5.3 Диэлектрические кабели связи для железных дорог | 59 |
| 5.4 Комбинированные кабели для железных дорог | 61 |
| 5.5 Трасса волоконно-оптической линии связи | 63 |
| 6 МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ | 65 |
| 6.1 Общие сведения | 65 |
| 6.2 Технологии передачи цифровых сигналов | 67 |
| 6.2.1 Плезিохронная цифровая иерархия | 68 |
| 6.2.2 Синхронная цифровая иерархия | 69 |
| 6.2.3 Асинхронный режим передачи | 70 |
| 6.2.4 Технология IP | 71 |
| 6.3 Технологии временного мультиплексирования | 73 |
| 6.4 Технологии волнового мультиплексирования | 79 |
| 6.5 Оборудование систем передачи с временным уплотнением | 86 |
| 6.5.1 Оконечное оборудование | 86 |
| 6.5.2 Оборудование промежуточного пункта | 94 |
| 6.6 Оборудование систем передачи со спектральным уплотнением | 100 |
| 6.7 Линейный тракт цифровых систем передачи | 102 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.7.1 | Регенераторы оптических сигналов | 102 |
| 6.7.2 | Усилители оптических сигналов | 103 |
| 7 | ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ | 111 |
| 7.1 | Устройства соединения элементов ВОЛП | 111 |
| 7.2 | Аппаратура цифровых систем передачи | 112 |
| 7.2.1 | Источники оптического излучения | 112 |
| 7.2.2 | Оптические модуляторы | 113 |
| 7.2.3 | Приемники оптического излучения | 114 |
| 7.2.4 | Волоконно-оптические фильтры | 115 |
| 8 | ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ | |
| | СЕТИ СВЯЗИ | 120 |
| 8.1 | Общие сведения | 120 |
| 8.2 | Системные аспекты создания цифровых сетей связи | 122 |
| 8.3 | Структура телекоммуникационных сетей связи железных дорог | 124 |
| 8.4 | Первичная сеть связи | 126 |
| 8.5 | Вторичные сети связи | 134 |
| 8.5.1 | Исходные положения | 134 |
| 8.5.2 | Сеть оперативно-технологической связи | 135 |
| 8.5.3 | Сеть общетехнологической телефонной связи | 136 |
| 9 | СИСТЕМА ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ | |
| | СВЯЗИ | 136 |
| 9.1 | Общие сведения | 136 |
| 9.2 | Источники синхронизации цифровых сетей связи | 140 |
| 9.3 | Аппаратура переключения каналов | 145 |
| 10 | СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ СЕТЬЮ СВЯЗИ | 152 |
| 11 | ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОН- | |
| | НО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ | 153 |
| 11.1 | Общие сведения | 153 |
| 11.2 | Ремонт волоконно-оптических линий связи | 155 |
| 11.3 | Аварийно-восстановительные работы | 156 |
| 12 | ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ | 157 |
| 13 | НАДЕЖНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЕТИ СВЯЗИ | 159 |
| 13.1 | Общие сведения | 159 |
| 13.2 | Факторы, влияющие на надежность | 161 |
| 13.3 | Расчет надежности ВОЛП | 168 |
| 13.4 | Способы повышения надежности первичной сети | 170 |
| 14 | СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ | |
| | БЕЗОПАСНОСТИ | 172 |
| 14.1 | Общие сведения | 172 |
| 14.2 | Методы защиты информации от несанкционированного доступа | 172 |
| 15 | КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ КАНАЛОВ И ТРАКТОВ | 177 |
| 15.1 | Общие сведения | 177 |
| 15.2 | Измерение оптической мощности | 178 |
| 15.3 | Измерение затухания ВОК | 179 |
| 15.4 | Методы измерения затухания с использованием проходящего света (метод обрыва) | 180 |
| 15.5 | Метод вносимых потерь | 182 |

| | |
|---|------------|
| 15.6 Измерение параметров ВОК методом обратного рассеяния | 183 |
| 15.7 Измерение дисперсии | 186 |
| 16 СЛУЖЕБНАЯ СВЯЗЬ ВОЛП | 186 |
| 17 СЛУЖЕБНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОМЕЩЕНИЯ | 187 |
| 17.1 Общие сведения | 187 |
| 17.2 Дом связи | 188 |
| 17.3 Линейно-аппаратный цех | 191 |
| 17.4 Линии передачи и коммутационные станции | 192 |
| 18 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ | 194 |
| 19 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ | 195 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ И ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .. | 200 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Состав измерительного оборудования | 202 |

Учебное издание

*СЕМЕНЮТА Николай Филиппович,
БУЙ Павел Михайлович*

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. М. Ризевская*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *Т. А. Пугач*

Подписано в печать 27.09.2012 г. Формат бумаги 60х84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. 11,75. Тираж 250 экз.
Зак № . Изд. № 14.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34