

1. Оценка максимальной скорости передачи по магистральным участкам сети.

Оценка максимальной скорости передачи по магистральным участкам сети, достаточно сложная задача, так как предполагает учет всех или основных факторов, определяемых потребностями абонентов в услугах связи. Для ее надежной оценки должен быть выполнен многофакторный анализ структуры связи, однако в инженерных расчетах очень часто довольствуются приближенной оценкой этого параметра, учитывая только основные моменты формирования структуры связи.

В пособии предлагается учитывать схему распределения цифровых потоков по объектам, в среднем, составленную на основании сведений по количеству абонентов в заданном сегменте сети.

Объекты (дома, организации и пр. в заданном микрорайоне) – перечисляются типы объектов и их количество, например, жилые дома 12 этажей – 2, детский сад – 1, школа здание 5 этажей – 1, и т.д., по каждому объекту определяется количество абонентов:

$N_{01} = \dots \dots \dots \text{аб.};$

$N_{02} = \dots \dots \dots \text{аб.}$ И т.д.

1.1. Скорость обмена в сети, которая должна быть предоставлена одному абоненту для получения услуг Triple play, может быть определена из следующих соображений.

Услуги Triple play представляют в виде перечня, в котором можно обозначить скорости для каждой из них.

Высокоскоростной доступ в интернет (до 100 Мб/с). Абоненты получают доступ ко всем ресурсам интернета на ПК или непосредственно на телевизоре, а также к дополнительным сервисам (почта, хостинг, и т.д.).

Услуги телефонной связи (до 1,0 Мб/с). IP-телефония и/или местная связь. Услуги IP-телефонии включают как непосредственное осуществление голосовой связи, так и целый набор дополнительных услуг, таких как информация о телефонных вызовах (на экране ТВ отображаются данные о вызовах), телефонная книга и автоматический номеронабиратель, АОН и др.

Телевизионное и радиовещание (до 500 Мб/с). Онлайн-трансляция телевизионных и радиоканалов на телевизоры или ПК. Передача пакетов телевизионных программ по запросу абонентов, в том числе и программ телевидения высокой четкости HDTV (High-Definition Television).

Услуги платных ТВ-программ – платные видеоканалы PPV (Pay Per View) (до 200 Мб/с). Предоставление абонентам популярного контента (новые фильмы, спортивные события, развлекательные программы).

"Видео по запросу" VoD (Video on Demand) (до 100 Мб/с). Выбор абонентами видеоконтента с сервера провайдера, когда можно вызвать на свой телевизионный экран любой новый или любимый фильм. Одной из разновидностей услуги VoD является SVOD (Subscription Video On Demand) – видео по подписке.

Трансляция со сдвигом по времени (Time Shifted TV). Демонстрация каналов/программ с задержкой на определенный промежуток времени (предварительно производится их запись и хранение в сети)

"Отложенный просмотр". На экране телевизора нажатием одной кнопки можно начать запись текущей ТВ программы и продолжить просмотр с того места, где абонент вынужден был отвлечься.

Персональный видеоманитон (PVR) (до 12 Мб/с). Видеоманитон в приставке, виртуальный сетевой персональный видеоманитон. Абонент может назначить время начала и окончания записи любого выбранного ТВ-канала или прямо в EPG планирует запись телепрограммы для того, чтобы просмотреть ее в удобное время.

Аудио-по-запросу (AoD) (до 5 Мб/с). Выбор абонентами аудиоконтента с сервера провайдера – загрузка аудиофайлов и аудиоархив из сетевой библиотеки на свои устройства и сохранение их на сетевом сервере библиотеки.

"Интерактивные сервисы" (скорость в обратном канале для абонента до 25 Мб/с). Интерактивные игры (GoD), голосования, рейтинги и т. д. Абоненты могут играть в игры на экране телевизора с помощью своих пультов дистанционного управления (игры с компьютером, когда вторым игроком выступает сетевой сервер или телевизионная приставка, интерактивные сетевые игры).

Телевизионная реклама и маркетинг. Позволяет оператором получать дополнительные доходы, в том числе и от рекламодателей, которые хотят продвигать свою продукцию целевой аудитории.

Телевизионная коммерция. Позволяет абонентам не выходя из дома заказывать различные товары у сторонних продавцов, связанных договором с провайдером услуг.

ТВ-банк (TV banking). Поддерживает доступ абонента к персональному банковскому счету.

Видеотелефония и видеоконференцсвязь (до 8 Мб/с). Позволяют абонентам в процессе общения видеть другого участника телефонного разговора и проводить многосторонние переговоры.

"Образовательные программы". Позволяет обеспечить диалог с преподавателем в реальном времени, провести обучение и тестирование, дает абоненту неограниченные возможности по совершенствованию собственных знаний путем доступа ко множеству учебных курсов и учебников.

Услуга мгновенных сообщений. Позволяет абонентам обмениваться текстовыми сообщениями (чат) с другими абонентами, абоненты могут также составлять и отправлять текстовые сообщения (SMS) на мобильные телефоны.

Телевизионная электронная почта. Организует доступ абонентов к своим почтовым ящикам.

1.2. Техническое обеспечения заданного QoS (оценка качества обслуживания) – это в первую очередь реализация необходимой полосы пропускания сети абонентского доступа.

Модель обеспечения качества обслуживания основана на архитектуре дифференцированных услуг (RFC2474, RFC2475, RFC3260). В основе архитектуры дифференцированных услуг (ДУ) лежат механизмы разделения трафика на классы и предоставления каждому классу соответствующего уровня обслуживания.

Каждому классу соответствует определенный код дифференцированной услуги. OLT для каждого кадра производит анализ значения идентификатора ДУ. На основании значения идентификатора ДУ OLT выбирает соответствующий механизм передачи пакета (механизм управления перегрузками). Управление пропускной способностью в случае перегрузок осуществляется с помощью механизма очередей. Пакеты помещаются в очереди, которые упорядоченно обрабатываются.

Классификация трафика абонента производится на OLT. Для осуществления классификации используется VLAN, в рамках которого выполняется передача трафика, поля IP Precedence в принятых от абонента пакетах.

Классификация трафика на OLT

Модель обеспечения качества обслуживания, применяемая на сети использует 7 классов трафика:

- класс трафика управления сетевыми устройствами;
- класс трафика услуги IP телефонии;
- класс трафика услуги IPTV;
- класс трафика VPN уровень Premium;
- класс трафика VPN уровень Silver;
- класс трафика VPN уровень Bronze;
- класс трафика услуги доступа к сети Интернет.

Классификация трафика управления производится на интерфейсе управления OLT.

Классификация трафика услуги IP телефонии производится по признаку VLAN, в рамках которого передается голосовой трафик при предоставлении интегрированных услуг.

Классификация трафика услуги IPTV производится по признаку VLAN, в рамках которого передается видео трафик при предоставлении интегрированных услуг.

Классификация трафика услуги VPN различных уровней производится по полю IP Precedence на порту абонента с подключенной услугой VPN.

Классификация трафика услуги доступа к сети Интернет производится по признаку VLAN, в рамках которого передается трафик абонента.

Пример схемы предоставления услуг

Предоставление услуг телефонии может осуществляться с применением программного коммутатора. Используемый протокол – SIP. При строительстве IMS-ядра подключение абонентов будет осуществляться непосредственно к ядру сети IMS.

Предоставление услуги передачи данных позволяет предоставить клиенту возможность обеспечения связи компьютеров в его локальной сети

(в сокращенном варианте это один компьютер) с ресурсами в публичной сети Интернет. Связь осуществляется по протоколу IP.

Предоставление IPTV (Передача видео по IP-сетям) - технология, предполагающая трансляцию видеосигнала по сетям передачи данных с использованием стека протоколов TCP/IP на телевизионный приемник абонента.

Общая схема организации связи, обеспечивающая предоставление услуг приведена на рисунке 1.1.

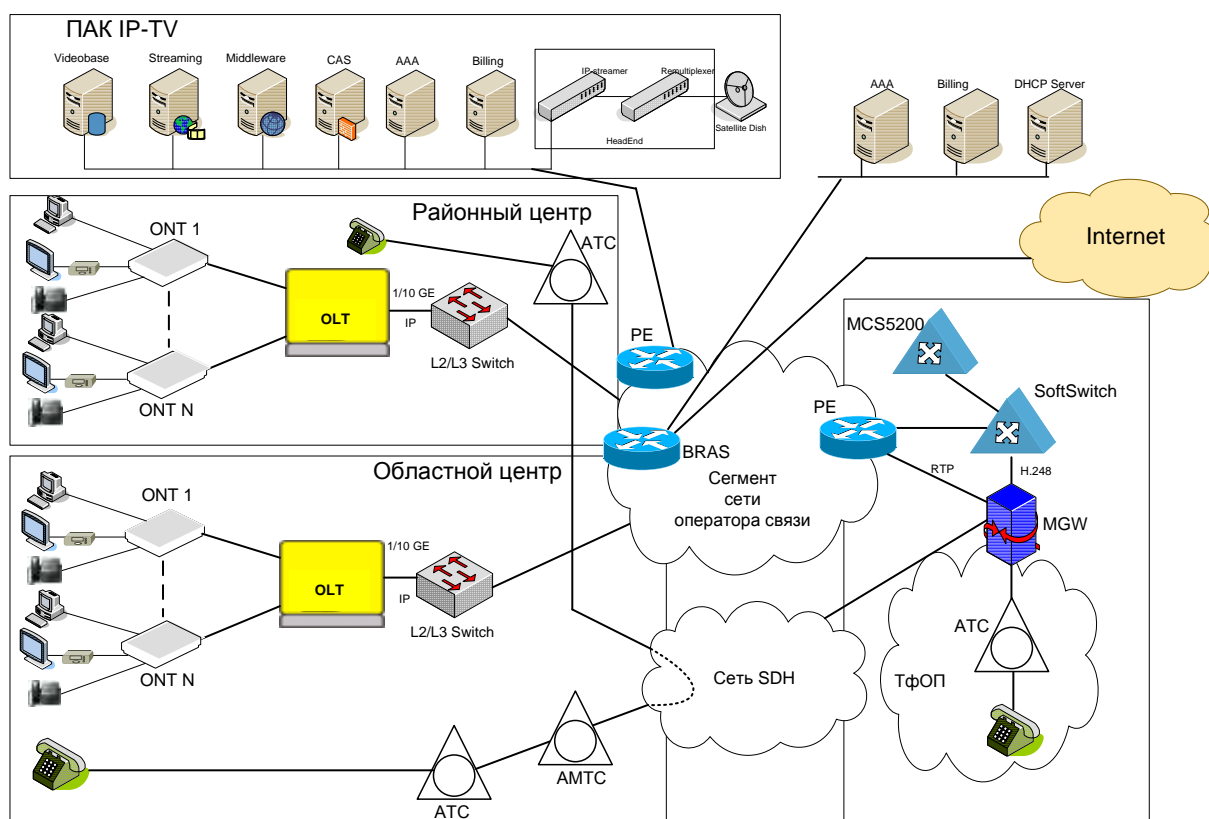


Рис. 1.1. Пример схемы предоставления услуг.

1.3. Предоставление услуг кабельного телевидения (КТВ / CATV)

Организация доступа к сети кабельного телевидения осуществляется по следующей схеме. Формирование группового сигнала производится на головной станции путем получения сигнала с телекоммуникационных спутников или по наземным сетям. Групповой высокочастотный телевизионный сигнал через оптический передатчик подается в волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), и доводится до места расположения OLT. Для передачи видеосигнала КТВ используется отдельная длина волны (1550nm) и дополнительное оборудование на центральном узле, так и у абонента. На центральном узле устанавливается усилитель сигнала кабельного телевидения и волновой мультиплексор (WDM) для введения видеосигнала в волокно. У абонента устанавливается ONT с RF-интерфейсом, от которого сигнал КТВ подается по коаксиальному кабелю к

телевизионному приемнику. Общий принцип предоставления услуг кабельного телевидения представлен на рисунках 1.2, 1.3.

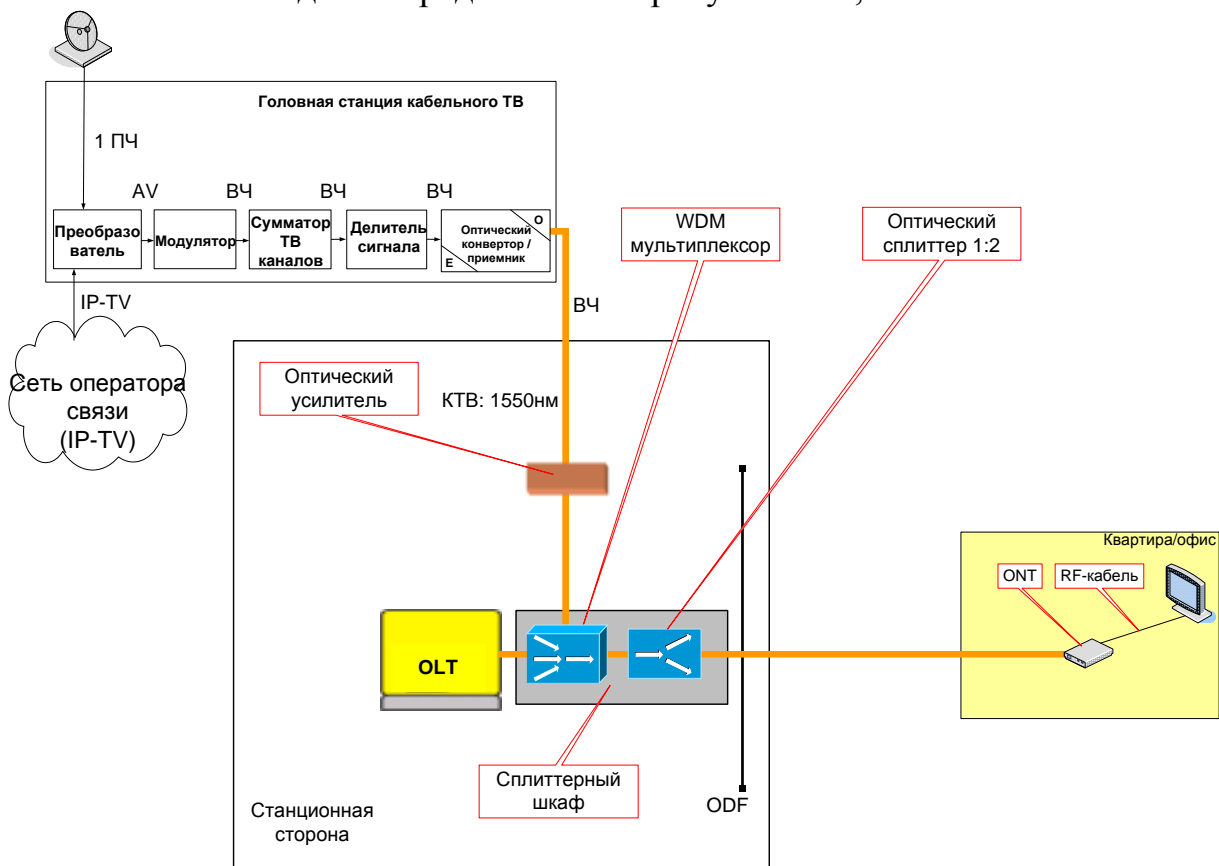


Рис. 1.2. Схема предоставления услуг КТВ.

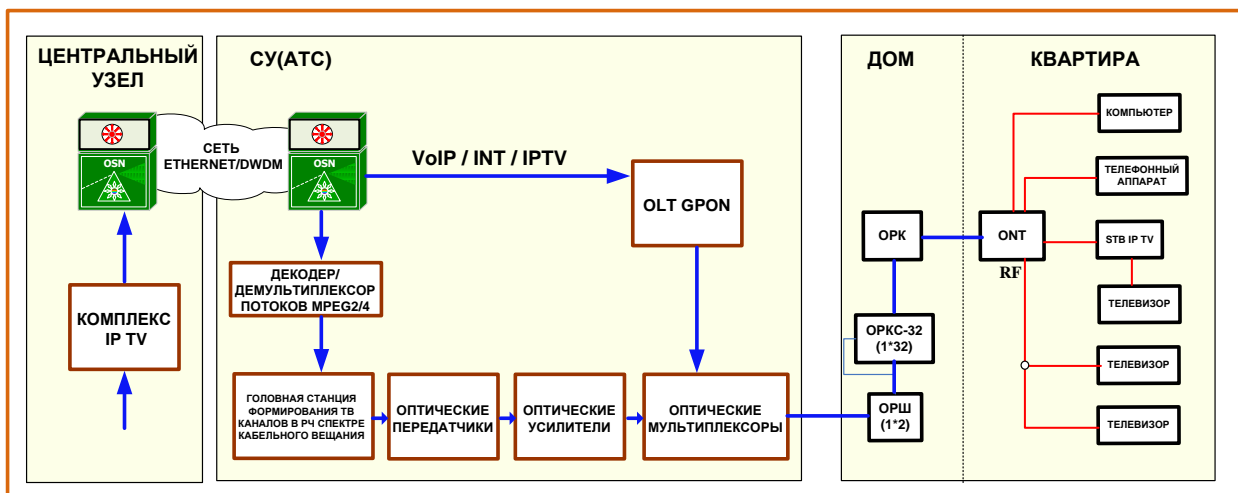


Рис. 1.3. Пример типовой схемы предоставления услуги КТВ

1.4. Эволюция оптических сетей доступа WDM-PON.

Сегодня наиболее популярной технологией ввиду экономичности и достаточно простой структуры является TDM-PON. Тем не менее, данная привлекательная конфигурация имеет ряд недостатков:

- ограниченная полоса пропускания;
- отсутствие гибкости зоны покрытия;

- слабые защитные механизмы.

С другой стороны, большую полосу пропускания, чем сети TDM-PON, могут обеспечить сети WDM-PON (рис.1.4). Также они могут улучшить безопасность, используя отдельные длины волн, назначенные для каждого абонентского устройства ONU/ONT. Поэтому сети WDM-PON рассматриваются в качестве перспективного решения для оптических сетей доступа. Однако на сегодня стоимость развертывания сети WDM-PON является недопустимо высокой. Вследствие этого ожидается, что решения для сетей TDM-PON: Ethernet PON (EPON), Gigabit PON (GPON) и 10 Гбит/с 10G-EPON будут превалирующими в ближайшие нескольких лет

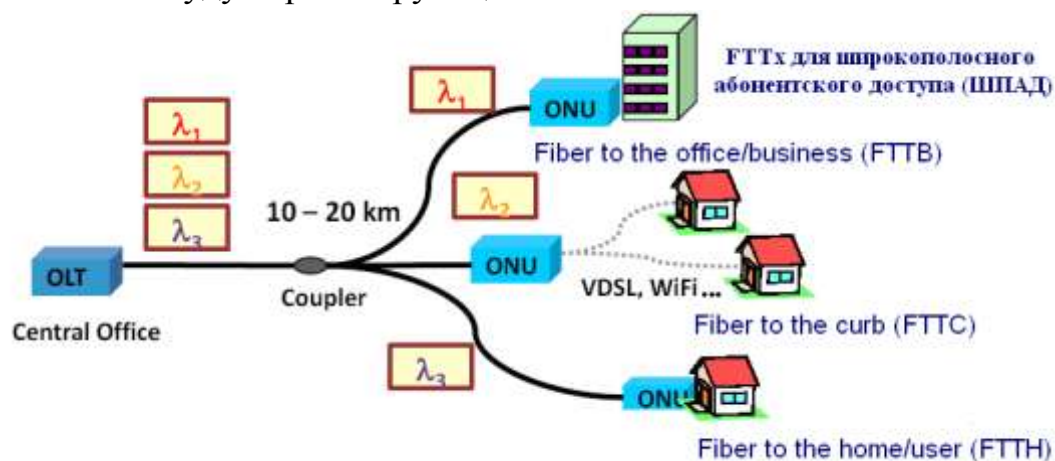


Рис. 1.4. Технология WDM-PON.

Эволюционный путь существующих систем TDM-PON в соответствии с концепцией, предложенной ITU, может быть представлен тремя основными направлениями:

- увеличение скорости до 10 Гбит/с;
- достижение расстояния передачи до 80 км (Long Reach PON);
- увеличение коэффициента разветвления.

Чтобы достигнуть увеличения скорости, требуются высокоскоростные трансиверы, работающие в режиме высокочастотных пульсаций (burst mode) и способные быстро восстанавливать уровень и фазу для каждого отдельного высокочастотного импульса.

Для выполнения требований 2 и 3 могут быть использованы полупроводниковые оптические усилители (SOA – Semiconductor Optical Amplifier). Это не вызовет прерывания текущих сервисов, так как SOA «прозрачен» к формату и скорости передаваемых данных.

Усовершенствование решений в TDM-PON должно ориентироваться не только в сторону увеличения полосы пропускания и расстояния, но и привносить в систему как можно больше интеллектуальных возможностей для создания интеллектуальных узлов IN (Intellectual Nodes). Так, например, установка пассивного сплиттера в TDM-PON осуществляется для

распределения оптической мощности между пользователями эквивалентно. Данный подход не требует дополнительных источников питания, таким образом, предполагая экономию энергии. Однако отсутствие интеллектуальных функций делает сеть негибкой и уязвимой для сетевых атак. Более того, данная архитектура не обеспечивает переход от TDM к WDM сетям. Сценарий эволюции обусловлен актуальными задачами, адресованными в первую очередь к существующим PON-решениям.

«Вызов» для ОСД.

PON сети, развернутые в настоящее время, нуждаются в решении следующих задач и проблем по причине использования строго пассивных компонентов:

- отсутствие гибкости в распределении мощности;
- статическая реконфигурация длин волн;
- сложность эволюции сети;
- уязвимость к сетевым атакам;
- энергетическая эффективность.

Отсутствие гибкости в распределении мощности.

В действующих ОСД пассивный оптический сплиттер распределяет оптическую мощность равномерно между всеми пользователями, подключенными к нему. Это вызывает потери энергии, поскольку все соединения принимают одно и то же количество оптической мощности вне зависимости от того, используются они в реальности или нет. Чтобы преодолеть эту проблему, PON сети будущего должны иметь способность регулировать количество оптической мощности, передаваемое на одно или несколько абонентских окончаний.

Статическая конфигурация длин волн.

Известный подход для конфигурирования длин волн – развертывание пассивного маршрутизатора длин волн и использование интеллектуальных узлов на стороне оператора для распределения длин волн. Это ограничивает способность сети выполнять такие важные функции, как балансировка трафика (нагрузки) между ненагруженными участками сети, динамическое распределение длин волн. Поэтому система будет способна направить любую входящую длину волны в один из выходных портов. Для целей масштабируемости необходимо также обеспечить возможность маршрутизации новых длин волн, назначаемых постепенно добавляемым входным портам.

Сложность конвергенции сетей.

Для перехода от TDM-PON к WDM-PON необходима возможность гибкого разнесения длин волн поверх распределенной сети. Существующие устройства (узлы) поддерживают какую-либо одну из данных технологий (TDM или WDM), но не обе одновременно.

Уязвимость к сетевым атакам.

Развертываемые сети широкополосного абонентского доступа практически лишены возможностей обнаружения и вычисления попыток несанкционированного доступа (НСД):

- DOS –атаки;
- прослушивание;
- маскирование злоумышленника под любое из работоспособных ONU.

Для примера, DOS-атака имеет место, когда неисправное (или с целью НСД) ONU отправляет достаточно мощный световой сигнал в восходящем направлении (upstream), при этом блокируя сообщения с линейным терминалом (OLT) для всех остальных ONU PON дерева. Поскольку PON – пассивная point-to-multipoint (P2MP) система, то достаточно сложно идентифицировать проблематичное абонентское устройство (аутентификация ONU) и предотвратить его дальнейшую интерференцию с сетью. Недавние исследования обнаружили новые методы аутентификации ONU, например, использование схемы кольцевой модуляции (Loopback Modulation scheme) и т.д. Можно лишь отметить, что возможность перераспределения мощности, описанная выше, позволит стать механизмам противодействия НСД более реальными и достижимыми с точки зрения оператора.

Энергетическая эффективность и рентабельность.

При вводе интеллектуальных функций в ОСД пассивные компоненты могут быть заменены на энергоемкие активные компоненты. Однако, подобные «жертвы» не могут иметь место из-за тенденции снижения стоимости развертывания ОСД. Лучшее решение для NGOA (New Generation Optical Access) – потребление энергии только в период изменения конфигурации сети. Как только механизм реконфигурация достигает требуемого состояния, происходит «блокировка» с прекращением энергозатрат. Реализация подобной системы поможет добиться гибкости, при этом решая проблему интенсивного потребления мощности при реконфигурации сети.

Безусловно, наибольшую лепту в загрузку полосы пропускания внесет интернет и видео трафик.

1.5. Методика расчета потребностей абонентов в скоростях.

Прежде всего, это доступ в интернет, здесь скорость доступа определяется технологией, которой может воспользоваться абонент, а также его потребностями с точки зрения скачивания файлов, просмотра ТВ программ, пользования соц. сетями и пр. Здесь для абонента важно понять, что скорость скачивания определяется не только скоростью доступа в интернет, а теми условиями, которые предоставляет владелец сайта или ресурса, например, скачать с официального сайта «Microsoft» какую –либо программу или приложение не получится быстрее чем за 3,5 Мб/с, даже при скорости доступа в 100 Мб/с.

С другой стороны провайдерам интернет выгодно поднимать скорость доступа, т.к. это приводит к увеличению их доходов от абонентов, поэтому важно понимать какой технологией доступа в интернет вы пользуетесь, какие

объемы информации вам необходимы и как долго вы готовы ждать поступления этой информации.

Учитывая эти соображения для «обывательского» пользования интернет ресурсами можно, в среднем, предложить скорость доступа в 50 Мб/с, которую в настоящее время обеспечивает практически любой провайдер, по самым различным технологиям, о которых речь пойдет ниже, вам выбирать.

Трансляция ТВ каналов.

В настоящее время широко распространено три системы ТВ вещания, прежде всего цифрового – эфирное, кабельное, спутниковое.

Здесь необходимо отметить, что если абонент пользуется только **эфирным вещанием**, то он будет бесплатно получать 20 ТВ каналов в цифровом виде, а доступ к интернет (смарт ТВ) будет связан с наличием дополнительного оборудования. Ситуация заметно улучшится, когда перейдем на стандарт сжатия MPEG-4, но в любом случае для получения качественного изображения для видео трафика по **стандарту DVB (Digital Video Broadcasting)** — европейский стандарт цифрового ТВ вещания, **в настоящее время это Стандарт DVB-T2** – второе поколение европейского стандарта эфирного цифрового вещания DVB-T, который обеспечивает вещание в MPEG-4. **Телевидение высокой четкости (High Definition TV, HDTV)** – лучшее качество на данный момент. HDTV существует в двух вариантах 1080i и 720p. Формат 720p обладает разрешением 1280x720 точек и прогрессивной разверткой, а формат 1080i имеет разрешение изображения 1920x1080 пикселей с чересстрочной разверткой.

Спутниковое ТВ вещание позволяет абоненту получить более чем в 10 раз большее количество каналов при том же качестве, но для этого необходимо установить специальное оборудование, которое может работать не во всех регионах.

Существенное достоинство этих двух систем, что абонент не связан ни с какой кабельной сетью, а только с антеннами и своим местоположением относительно телецентра или соответствующего спутника.

Кабельное ТВ вещание организуется по различным сетевым технологиям и обеспечивает надежную трансляцию ТВ сигналов. Главное достоинство состоит в том, что ТВ сигнал доставляется по кабелю непосредственно к абоненту и надежно защищен от воздействия внешних факторов.

С известной долей приближения можно считать, что сегодня один канал телевизионной трансляции требует полосы пропускания порядка 8 МГц и 27.0 МГц — для непосредственного ТВ вещания (НТВ) со спутников.

Для передачи сигналов HDTV эта полоса в канале должна быть увеличена как минимум до 12 МГц.

Телефония. Безусловно, в настоящее время все преимущественно пользуются мобильной связью, но нельзя забывать и про стационарные телефоны, поэтому для предоставления всех услуг телефонии, например –

видео телефон, конференцсвязь, автоответчик, определитель номера и пр., требуют скорости от 1 до 5 Мб/с.

Получаем, что минимальная скорость, предоставляемая одному абоненту, должна определяться суперпозицией скоростей по каждой из предоставляемых услуг.

Таким образом, оценка скорости, предоставляемой каждому абоненту в сети, может быть определена по выражению:

$$V_{\Sigma ab} = (N_{ab} \times 0,064) \times Y_{тлф} + V_{\Sigma инт} \times Y_{инт} + V_{\Sigma тв} + V_{Eth} \quad (1.1.)$$

где: N_{ab} – число ТЛФ каналов, предоставляемых абоненту (1–3, для организаций до 10);

$Y_{тлф}$ – удельная нагрузка, т.е. средняя нагрузка, создаваемая одним абонентом, $Y_{тлф} = 0,01 – 0,05$ Эрл;

$V_{\Sigma инт}$ – скорость доступа абонента в интернет 10 – 100 Мбит/с (чем больше, тем дороже);

$Y_{инт}$ – удельная нагрузка, т.е. средняя нагрузка, создаваемая одним абонентом на канал доступа интернет, $Y_{инт} = 0,05 – 0,2$, учитывает возможное количество абонентов выходящих одновременно в интернет и время пользования;

$V_{\Sigma тв}$ – суммарная скорость для предоставления услуг ТВ вещания, можно определить из следующих соображений;

- все абоненты пользуются ТВ приемниками одновременно;
- количество ТВ приемников у абонента – макс 3;
- количество одновременно включенных каналов – 2 TV, 1 HDTV;

V_{Eth} – доступ к локальным ресурсам, интерактивные игры и пр., суммарную потребность в скоростях на одного абонента можно оценить в пределах 2 – 5 Мб/с.

Таким образом, в приведенном варианте можно принять следующие значения:

- скорость необходимая для телефонии – 5 Мб/с;
- скорость для выхода в интернет – 100 Мб/с;
- суммарная скорость необходимая для просмотра ТВ программ у одного абонента буде равна:

$$V_{\Sigma тв} = (2 \times 8 + 1 \times 12) = 28 \text{ Мб/с};$$

$$- V_{Eth} = 5 \text{ Мб/с}$$

В результате, к примеру, в сегменте сети на 1000 абонентов суммарная скорость обмена на магистральных участках составит:

$$V_{\Sigma ab} = 5 + 100 + 28 + 5 = 138 \text{ Мб/с}$$

$$V_{\Sigma сет} = 138 \times 1000 = 138000 \text{ (Мб/с)}$$

В результате, для предоставления основных услуг абоненту сети пропускная способность абонентского канала должна быть не менее 138 Мб/с. В зависимости от требований абонентов эта скорость в проекте может быть увеличена, что приведет к увеличению суммарной скорости обмена в сети.

Необходимо отметить, что суммарная скорость будет распределяться по магистральным участкам сети в зависимости от технологии построения сети, количества и потребностей абонентов, обслуживаемых этим участком.

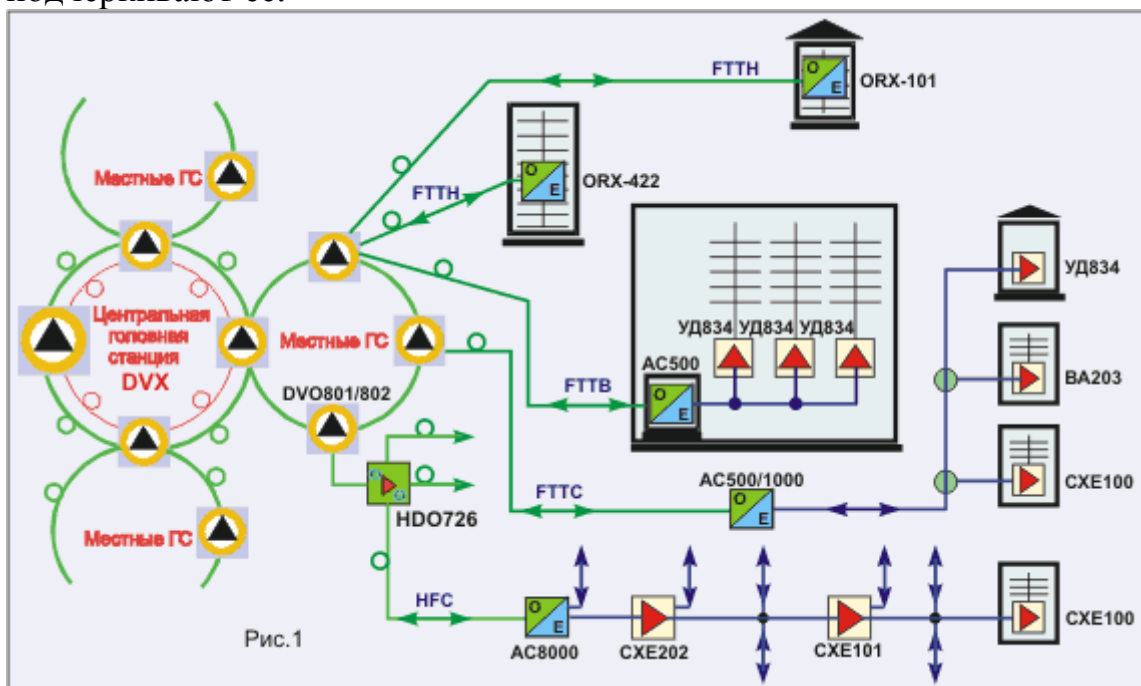
В этой связи становится важным выбор правильной технологии построения сети, которая обеспечит не только сиюминутные потребности, но и возможность дальнейшего развития сети.

2. Эксплуатация сетей широкополосного доступа

Сети FTTx – оптоволоконно на последней миле – операторы фиксированной связи развертывают все активнее. Как правильно и экономически эффективно производить измерения при строительстве и эксплуатации таких сетей?

Сети FTTx (в частности, с использованием технологии PON) – самый перспективный вариант систем абонентского широкополосного доступа (ШПД). Реализовать все требования по скорости доступа (концепция triple play предполагает минимум 30–50 Мбит/с на абонента) можно только с использованием ВОЛС. Поэтому рано или поздно все абонентские сети должны быть переведены на оптику, а все остальные технологии, по сути, только переходные варианты.

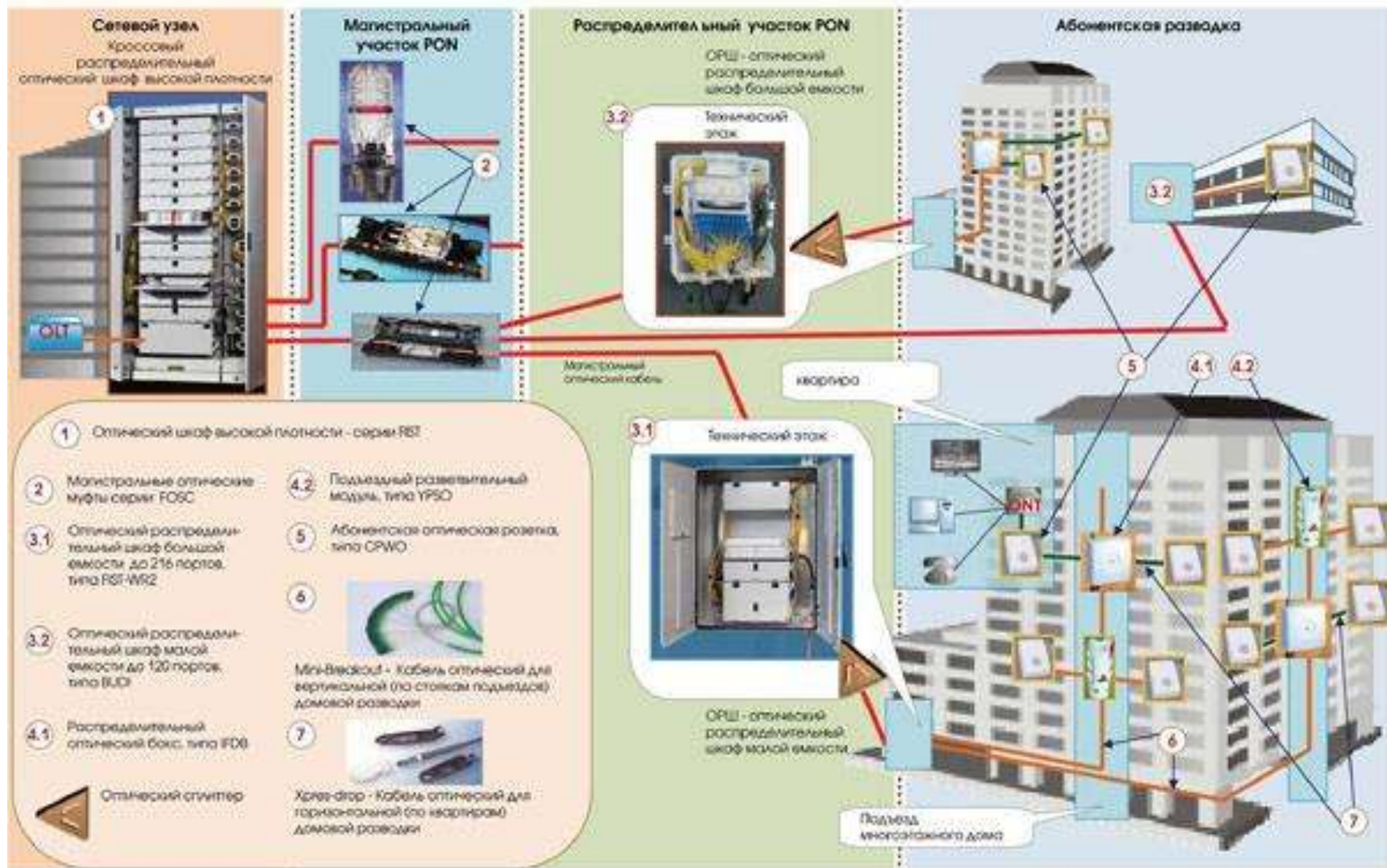
Тормозят распространение FTTx стоимость решения и длительность процесса модернизации сетей. Стоимость решения неуклонно снижается, и ее сдерживающее влияние столь же неуклонно уменьшается. Временной же фактор более существенный: провести коренную реконструкцию кабельной абонентской инфраструктуры в одночасье невозможно. Кабельные абонентские системы городов создавались на протяжении 50–100 лет, и полная замена их на оптику – даже при наличии финансирования и доброй воли со стороны операторов – может занять 20–30 лет. Но эти обстоятельства не умаляют ценности технологии FTTx, а наоборот, подчеркивают ее.



Фазы развития проекта FTTx.

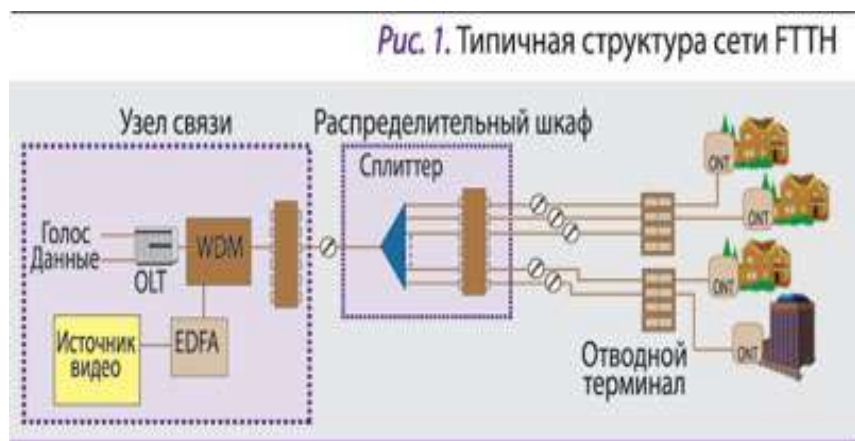
Архитектура FTTH на базе PON обычно поддерживает протокол Ethernet. В некоторых случаях используется дополнительная длина волны нисходящего потока (downstream), что позволяет предоставлять традиционные аналоговые и цифровые телевизионные услуги пользователям без применения телевизионных приставок с поддержкой IP.

Построение оптических сетей доступа FTTH для многоэтажных жилых домов



Точка-точка (P2P), на базе активной оптической сети (AON).

FTTx/PON уже сегодня позиционируется как технология массового внедрения, т.е. технология, охватывающая более 10–15% населения того или



иного города или региона. Понимание массовости технологии очень важно с точки зрения подхода к эксплуатации и измерениям. Дело в том, что по мере развития технологии изменяется

понимание задач проекта и само отношение к системе ШПД у службы эксплуатации.

А именно:

На этапе подготовки проекта технология мало изучена, непонятна, поэтому измерительная компонента велика, хотя и ориентирована на лабораторные испытания. Нет совместимости между разными устройствами, стандарты «дышат», помехоустойчивость не выявлена и нуждается в проверке, трактовка спецификаций разными производителями различается, оборудование сырое и т.п. Выявить все негативные факторы можно только в лабораторных условиях, тем более что эксплуатационных приборов на этом этапе нет. На этапе пробного внедрения задачи мало меняются, все по-прежнему сводится к лабораторным исследованиям с той только разницей, что они переносятся в полевые условия.

На этапе внедрения появляется система эксплуатации и встает проблема эксплуатационных измерений. Малое количество абонентов позволяет на начальном этапе проводить полное тестирование каждого абонента. Ничего опасного в этом нет, если только накопленный опыт не «бетонируется» в объемных инструкциях, которые не применимы при массовом внедрении. В середине фазы внедрения нередко появляется миф о том, что «все дело в веревках». «Веревки» рассматриваются обобщенно: для ADSL это абонентские пары, для FTTx – проложенные волокна, для сотовых сетей и WiMAX – радиоэфир. Возникает иллюзия, что если несущая среда, «веревки», в порядке, то вся система ШПД должна работать нормально. Объективный эксплуатационный опыт массовых проектов ADSGPRS показывает, что такое мнение – не более чем миф, и миф вредный.

На этапе массового внедрения о полномасштабных измерениях нужно забыть. У инженеров нет времени возиться с каждым абонентом, так как есть план подключений. Если на предыдущем этапе служба эксплуатации накопила внушительный опыт и выделила три-четыре параметра, существенных для абонентов сети, то на этапе массового внедрения процесс можно сделать управляемым, тратя на контроль этих параметров 10–15

минут при каждом подключении. В противном случае измерения вообще не будут проводиться, процесс внедрения ШПД пойдет хаотически, что неизбежно приведет к коллапсу проекта.

Технология FTTx/PON проходит все эти стадии.

Но у нее есть отличия:

- внедрение FTTx/PON требует серьезной реконструкции абонентской кабельной системы.

Здесь нет возможности использовать уже существующие среды передачи сигналов (абонентские пары в ADSL, радиоэфир в WiMAX, инфраструктуру сети сотовой связи в 3G и пр.).

По сути, кабельная сеть создается с нуля. Это удлиняет фазу внедрения и отодвигает начало массового внедрения. С технологической точки зрения это требует включения измерений в процесс развертывания и пуско-наладки кабельной сети:

- сам факт коренной модернизации и нового строительства сети, с одной стороны, требует серьезного отношения и больших инвестиций в проект FTTx, с другой – позволяет службе эксплуатации заранее почувствовать дыхание массового проекта;
- FTTx/PON – самая долгоживущая технология, поэтому необходимость модернизации такой сети возникнет не скоро.

FTTx/PON медленнее проходит все фазы проекта, медленнее входит в силу и становится массовой, но зато медленнее и устаревает.

Рассмотрим теперь принципы организации измерений в сетях FTTx/PON с учетом специфики каждого этапа.

Измерения в процессе строительства.

Большая часть измерений в процессе развертывания сети FTTx выполняется в полевых условиях и ориентирована на портативные эксплуатационные приборы. Измерения эти должны выполняться инженерами, имеющими специальный опыт работы с ВОЛС. Обычно у оператора таких специалистов мало, если они есть вообще.

Поручать измерения низкоквалифицированному персоналу – большая ошибка, так как восстанавливать сеть после неграмотной эксплуатации дорого и сложно.

В этой ситуации оператор может либо быстро наладить процесс обучения, либо передать развертывание сети квалифицированной компании-подрядчику, имеющей опыт работы с ВОЛС.

Важнейшая характеристика оптической кабельной сети – затухание сигнала от передатчика до приемника. Иногда этот показатель называют бюджетом линии. Он зависит от нескольких факторов, таких как:

- параметры передатчика: излучаемая мощность, температура, изменение уровня сигнала в процессе эксплуатации оборудования;
- параметры коннектора: тип и качество соединения;
- параметры кабеля: потери сигнала, влияние температуры;
- параметры приемника: чувствительность детектора;

- другие параметры: надежность оборудования, скорость восстановления, резервирование и пр.

Не все перечисленные параметры нуждаются в контроле в процессе эксплуатации. Но среди них есть группа, контролировать которую нужно обязательно, – параметры коннектора. Коннектор – это место, где чаще всего происходят изменения в уже проложенной кабельной системе, и именно здесь нарушения наиболее вероятны.

Воистину связь – наука о контактах.

Контроль оптических разъемов.

Табл. 1. Ожидаемые значения ORL для FTTx, дБ

Длина абонентской линии, м	Длина волны		
	1310 нм	1490 нм	1550 нм
50	53	56	57
300	46	50	50
500	44	47	48
1000	41	45	46

Один из ключевых факторов, влияющих на бюджет линии FTTx/PON, – чистота коннекторов. Например, пылинка размером 1 микрон в одномодовом кабеле уменьшает сигнал на 1% (0,05 дБ). Но еще опаснее пыль и грязь в сетях кабельного ТВ, где используются мощные источники сигнала до +30 дБм (1 Вт). Здесь пыль и грязь становятся источником нагревания такой мощности, что оптический интерфейс может расплавиться.

Негативные изменения могут вызывать не только грязь или

пыль. Это могут быть следы изопропилового спирта, жир от рук, масло, следы геля, чернил на жировой основе (рис. 2) или любая комбинация этих факторов.

Для диагностики качества и чистоты поверхности коннектора применяются эксплуатационные микроскопы либо видеомикроскопы.

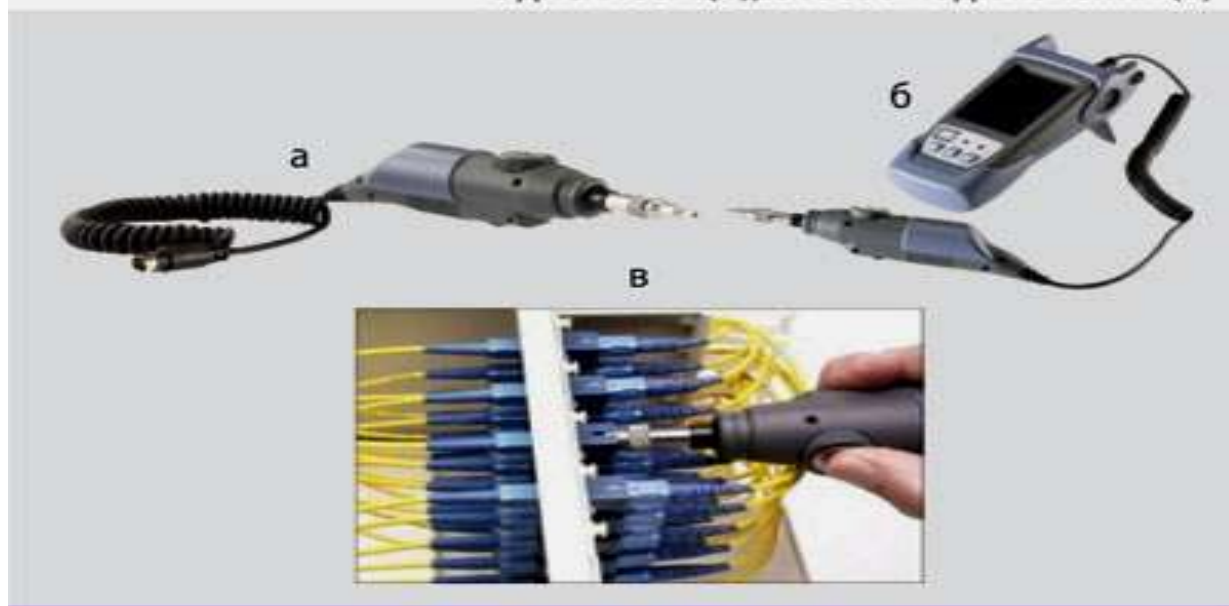
Рис. 2. Варианты загрязнения коннектора



иногда нужно посмотреть сотни таких коннекторов.

Использовать видеомикроскопы (рис.3) в проектах FTTx предпочтительнее, поскольку они дают более объективную картину состояния коннектора и меньше утомляют инженера, которому за смену

Рис. 3. Варианты видеомикроскопов: без дисплея (а), с дисплеем (б), способ подключения (в)



Применение анализаторов оптического затухания.

Для паспортизации развертываемой кабельной сети FTTx используют приборы двух основных типов: анализаторы оптического затухания (Optical Loss Test Set, OLTS) и оптические рефлектометры (OTDR).

Самый популярный и простой метод паспортизации основан на применении анализаторов оптического затухания. С их помощью можно измерить два ключевых показателя качества оптического волокна:

- затухание в линии;
- уровень возвратных потерь (ORL).

Измерения проводятся с помощью двух приборов OLTS в два этапа. Первый этап – калибровка каждого прибора по параметру ORL, т.е. измерение уровня ORL с использованием служебного соединительного кабеля. Цель – определение минимального уровня ORL, который можно измерить. Ограничивающим фактором может выступать качество коннектора и особенности проложенного кабеля.

Табл. 2. Преимущества и недостатки применения двух приборов класса OLTS	
Преимущества	Недостатки
Измерения затухания и ORL выполняются с помощью одного прибора	Требуются два инженера
Есть возможность идентификации волокна	Между инженерами должна быть телефонная связь
Оба параметра измеряются с двух сторон	Один инженер должен переходить от одного терминала к другому
Возможна идентификация макроперегибов при тестировании на длинах 1550 и 1310 нм за счет дополнительного теста на 1625 нм	В случае обнаружения неисправности или макроперегиба нужно дополнительно использовать OTDR

Второй этап – собственно измерения.

В результате могут быть сформированы таблицы значений, связанных с длиной абонентских участков. В качестве возможных предельных норм показателей ORL в табл. 1 приведены значения возвратных потерь для разных длин абонентской линии при двух коннекторах в линии (в системе FTTH в линии может быть четыре коннектора, каждый из которых способен внести ORL до 40 дБ).

В процессе тестирования системы FTТх пара приборов OLTS используется в каждом «плече» сети для измерения затухания и ORL (рис. 4).

Табл. 3. Преимущества и недостатки применения одного прибора класса OTDR	
Преимущества	Недостатки
Возможно измерение параметров затухания и ORL	ORL измеряется от ONT, т.е. в направлении, обратном распространению видеосигнала
Возможно проводить измерения в распределенных кабельных системах	Инженер должен переходить от одного терминала к другому
Возможна идентификация макроперегибов при тестировании на длинах волн 1550 и 1310 нм за счет дополнительного теста на 1625 нм	Инженер должен иметь высокую квалификацию для правильной интерпретации результатов
Высокая скорость измерений	
Быстрый поиск неисправности в случае обрыва	
Требуется только один инженер	

Указанный метод имеет свои преимущества и недостатки (табл.2).

Для оптимизации процедуры измерений используют средства автоматизации. Они позволяют перейти от схемы «точка–точка» к схеме «точка–многоточка», где один из приборов фактически стационарно устанавливается в точке объединения кабелей после сплиттера (рис. 5), и выполнять измерения силами одного инженера. Важным фактором является реализация в приборах автоматической системы отчетности, которая больше

Рис. 4. Применение двух OLTS для проведения паспортизации кабельной сети



Рис. 5. Применение автоматизации в методике с двумя OLTS



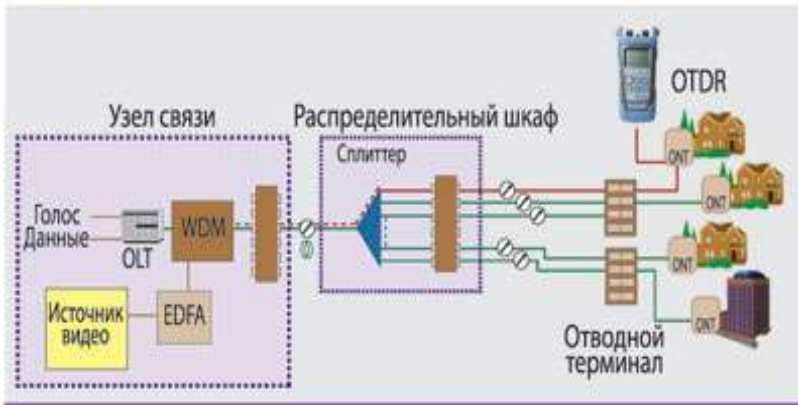
соответствует процессу массового строительства, когда один инженер за смену должен обслуживать по несколько десятков волокон.

Применение оптических рефлектометров.

Альтернативным методом паспортизации кабельной сети является

применение оптических рефлектометров (OTDR), которые благодаря обеспечиваемой ими возможности проведения измерений с одной стороны одним инженером (рис. 6) широко используются службами эксплуатации ВОЛС операторов связи.

Рис. 6. Применение OTDR для проведения измерений FTTx/PON

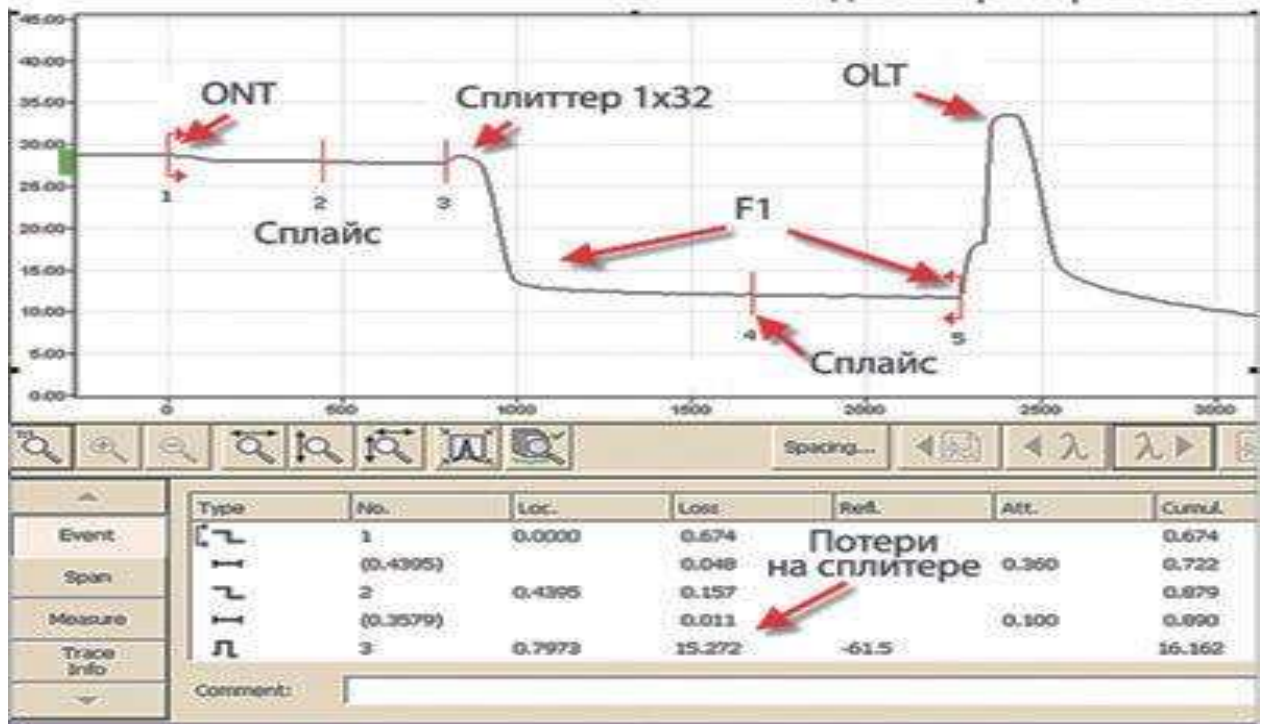


Все отдельные волокна между OLT и сплиттером могут быть протестированы со стороны ONT с использованием одного OTDR. В процессе тестирования измеряется затухание в каждой волокне, а также обнаруживаются макроперегибы, которые

ухудшают качество передачи сигнала.

Особенность сетей FTTx – малые, по сравнению с магистральными ВОЛС, длины волокон. Может оказаться, что мертвая зона OTDR не позволяет выявить негативное влияние коннектора. В таком случае

Рис. 7. Вариант трассы от ONT до OLT на оптимизированном под PON приборе OTDR



рекомендуется использовать тестовый кабель длиной 300–500 м.

Применение OTDR для контроля сетей FTTx требует тщательной настройки измерений и оптимизации прибора под задачи указанных сетей (рис.7). Причиной тому – широкое применение в сетях FTTx (в первую очередь в сетях PON) кабельных систем древовидной топологии. Если OTDR

не оптимизирован под задачи тестирования PON, сигналы от разных «плеч» древовидной системы могут мешать друг другу, в результате чего полученные трассировки рефлектограмм окажутся бесполезными. На измерениях отрицательно сказывается и присутствие сплиттеров в тестируемом канале. Потери тестового оптического сигнала в процессе его отражения на сплиттере приводят к появлению характерной «ямы» на рефлектограмме, так что рефлектометр должен иметь достаточный динамический диапазон для отображения состояния кабеля после сплиттера.

Применение OTDR имеет свои преимущества и недостатки (табл. 3).

Измерения в процессе эксплуатации.

Если при развертывании сети FTTx измерения выполняются при паспортизации построенной кабельной инфраструктуры, то в процессе эксплуатации, на этапах внедрения и массового внедрения – при подключении абонента и в ходе поиска и устранения неисправностей.

Измерения при подключении абонента.

Обычно показателем качества подключения служит уровень затухания сигнала. Несмотря на внешнюю простоту схемы организации измерений (рис. 8), измерения на этом этапе имеют свои нюансы:

во-первых, теперь они привязаны не к волокнам, а к пользователю или конкретному ONT; во-вторых, важно измерить затухание не в одной, а в нескольких точках.

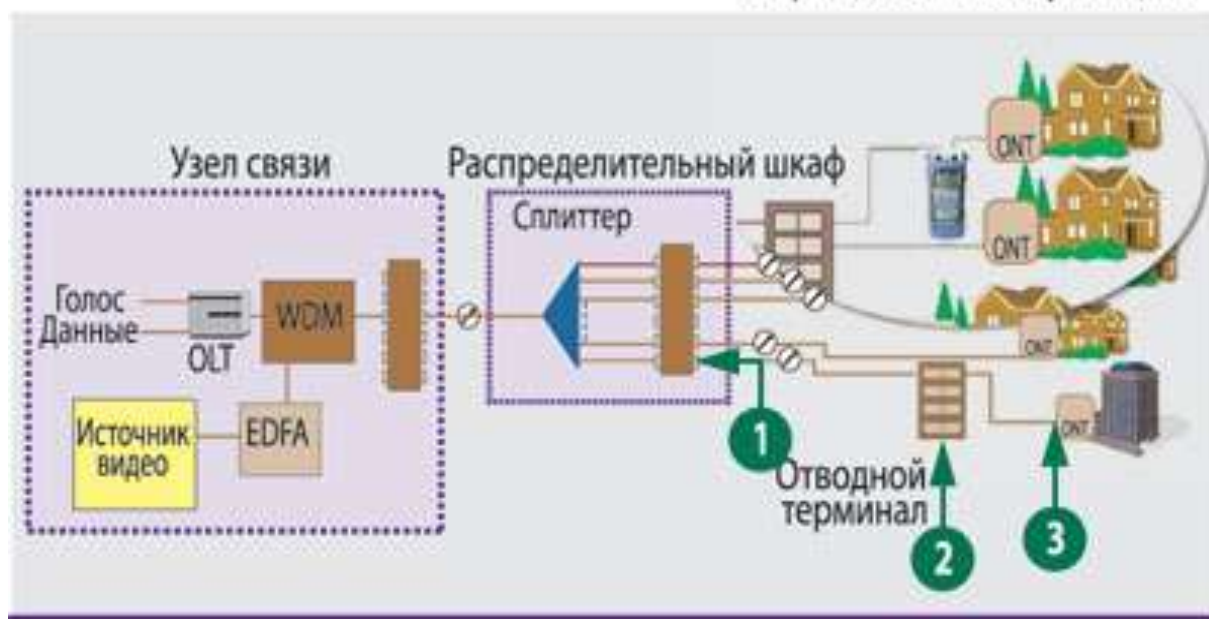
Табл. 4. Измеряемые параметры сети FTTx/PON		
Группа параметров	Основные метрики качества	Число контролируемых параметров
Качество кабеля	IL, ORL	4
Качество канала доступа	- Th (пропускная способность), - Lat (задержка), - LD (девиация задержки), - FE (ошибка в кадре), - FL (потери кадров)	6
Качество домашнего канала Wi-Fi	- SSID (идентификатор точки Wi-Fi), - Th (пропускная способность), - Lat (задержка)	4
Качество услуги VoIP	- MOS, - R-фактор, - NER (доля нормальных вызовов), - ASR (доля вызовов, закончившихся разговором)	16

Качество услуги IPTV	- MDI (индекс доставки мультимедиа), - MLR (потери видеопакетов), - DF (фактор задержки в IPTV)	15
Качество интернет-услуг	- Th (пропускная способность), - Lat (задержка)	6
	ИТОГО	51

Для проведения измерений используется простой измеритель оптической мощности, который может работать в режиме «на проход» для определения затухания в условиях включенного ONT. Наличие результатов такого тестирования особенно важно, поскольку подключение абонентов часто выполняется субподрядчиками, а оператору нужно знать параметры качества соединения на абонентской стороне.

В случае возникновения расхождений в показателях качества в точке подключения абонента необходимо провести пошаговый анализ и измерить

Рис. 8. Принципы измерения в кабельной сети в процессе эксплуатации



затухание в разных точках для нахождения точки нарушения качества. Это могут быть, например (см. рис. 8):

- 1 точка подключения распределительного кабеля (в распределительном шкафу);
- 2 точка подключения отводного кабеля (в отводном терминале);
- 3 точка подключения устройства ONT.

Поиск неисправностей.

Измерения, связанные с поиском и устранением неисправностей в кабельной сети, включают в себя рефлектометрию на различных участках с использованием четырех длин волн:

- 1490 нм (передача голоса и данных «вниз» – к абоненту);
- 1550 нм (дополнительный канал для вещания видео);
- 1310 нм (передача голоса и данных «вверх» – от абонента);
- 1625/1650 нм (служебный канал для поиска неисправностей).

При поиске неисправностей прибор OTDR применяется в режиме короткого импульса (5 нс), что позволяет находить неисправности, не оказывая влияния на качество услуг, предоставляемых пользователям, подключенным к тому же сплиттеру.

За пределами кабеля.

Измерения на этапе эксплуатации базируются на тех же принципах и оборудовании, что используются и при развертывании кабельной сети. В этом есть положительный момент: оператор может использовать накопленный опыт, кадры и оборудование. Однако строительство сети FTTx/PON – дело настолько масштабное, что совокупность необходимых измерений кабельной системы вполне может заслонить все другие вопросы контроля сети и понимание целей и задач FTTx как проекта массового ШПД.

Тогда и возникает пресловутый миф о «веревках», и в результате служба эксплуатации уделяет внимание только той части системы FTTx, которая заново создается в процессе строительства оптической последней мили. И вся измерительная компонента проекта увязывается только с кабелями и измерениями затухания и ORL.

В действительности это не так, но из-за масштаба строительства сети FTTx заблуждение будет максимально устойчивым, а потому – максимально губительным.

Как уже говорилось, миф о «веревках» характерен не только для FTTx, он может проявиться во всех проектах ШПД. Как правило, его несостоятельность становится очевидной на этапе массового внедрения, когда выясняется, что поверившая мифу служба эксплуатации упустила время, чтобы подготовиться к действительно важным работам массового внедрения.

Мировой опыт массовых ADSL-проектов дает следующее распределение неисправностей по различным категориям:

- абонентские подключения – 30%;
- кабельная сеть – 10%;
- настройки DSLAM – 20%;
- сети IP (сеть агрегации, городские сети и транспортные сегменты) – 20%;
- услуги и другие проблемы – 20%.

Мы видим, что «веревки» здесь отнюдь не являются ключевым фактором. Статистика по более «молодым» проектам FTTx/PON только собирается, но уже сейчас можно сказать, что с «веревками» будет связано еще меньше проблем, чем в случае с ADSL.

Миф не возникнет, если рассматривать сеть FTTx/PON с точки зрения целей всего проекта ШПД – обеспечения услуг широкополосного доступа. Понимание того, что пользователь жалуется на качество услуги, а не на

паспорт кабеля, – лучшая вакцина от негативного влияния мифа о «веревках».

Рассматривая сеть FTTx/PON как решение, обеспечивающее предоставление услуг широкополосного доступа, можно увидеть структуру, более сложную, чем та, что показана на рис.1. В ее состав входят маршрутизаторы для подключения к Интернету, шлюзы в ТфОП, видеосерверы, домашние сети и т.п. Комплексное понимание проекта FTTx/PON требует создания широкой метрологической модели измерения параметров. Вместо четырех параметров, измеряемых в кабельной сети (затухание, ORL, рефлектограмма, качество коннекторов), при таком подходе нужно измерять на порядок большее число параметров (табл. 4).

Определить, какие из перечисленных параметров действительно критичны для отдельного проекта FTTx/PON, а какие нет – задача фазы внедрения, к началу которой подошли отечественные операторы.

Глава 3 Расчет параметров кабельной системы, выбор конструкции ОК.

3.1 Параметры оптических волокон.

Оптические волокна отличаются между собой геометрическими и оптическими параметрами, что достигается в процессе их производства. Но наиболее важными являются параметры передачи. Основные параметры наиболее часто используемых волокон описаны в нормативных документах – Рекомендациях Международного Союза Электросвязи (ITU-T), характеристики оптического волокна приведены в таблице 3.1.[12 - 45с]:

Ниже, приведены описание типов оптических волокон:

SSF – стандартное оптическое волокно с нулевой дисперсией на $\lambda_{0D} \approx 1310$ нм;

DSF – оптическое волокно со смещенной нулевой дисперсией вблизи $\lambda_{0D} \approx 1550$ нм;

LMF – оптическое волокно с минимизированными потерями на $\lambda \approx 1550$ нм;

\pm NZDSF – оптическое волокно с расширенным окном прозрачности в районе $\lambda \approx 1550$ нм, для возможности эффективного спектрального уплотнения (DWDM), а также в качестве компенсатора дисперсии.

Табл.3.1. Классификация типов волокна согласно рекомендациям МСЭ-Т.

Параметры оптических волокон рекомендуемые МСЭ		№ рекомендации МСЭ			
		G.652	G.653	G.654	G.655
Тип волокна		SSF	DSF	LMF	±NZDSF
Окна прозрачности, нм		1300/1550	1500-1600	1550	1530-1565
Затухание, дБ/км	1310 нм	<1.0/0.34	<1.0	н/н	н/н
	1383 нм (максимум ОН)	<2.0	<2.0	н/н	н/н
	1550 нм	<0.5/0.25	<0.5/0.25	<0.22/ 0.15-0.19	<0.35/ 0.19-0.25
Диаметр поля моды, мкм	1310	9.0-10.0	н/н	н/н	н/н
	1550	9.0-10.0	7.0-8.3	10.5	8-11
Длина волны отсечки (кабеля/волокна)		1260/1280	1270/-	1350/1530	<1480/ <1470
Длина волны нулевой дисперсии, нм		1310±10	1550±25	1310±10	н/н
Наклон кривой D при нулевой дисперсии, нс/нм ² /км		0.093	0.085	0.06	<0.169

Стандарты, определяющие типы оптических волокон согласно рекомендациям МСЭ-Т. [12 – 46с]

Стандарт G.652 стандартное одномодовое волокно с несмещенной дисперсией классифицируется стандартом G.652 (получило широкое распространение с 1983 года). Его параметры оптимизированы для диапазона длин волн 1,31 мкм, в котором волокно имеет нулевую хроматическую дисперсию и минимальное затухание. Диаметр световедущей жилы волокна — G.652 равен 9 мкм, а оболочки — 125±2 мкм. Это волокно используется

для одноволновой и многоволновой передачи (спектральное уплотнение), в том числе в диапазоне длин волн 1,55 мкм и обеспечивает передачу информации со скоростями до 10 Гбит/с на средние расстояния (до 50 км). Использование волокна — G.652 при более высоких скоростях передачи требует усложнения оконечной аппаратуры, что, в свою очередь, приводит к значительным финансовым затратам.

Важнейшими параметрами ОВ является оптическое потери и соответственно затухание передаваемой энергии. Эти параметры определяют дальность связи по оптическому кабелю и его эффективность. Затухание световодных трактов обусловлено собственными потерями в волоконных световодах (α_c) и дополнительными потерями, так называемыми кабельными (α_k), обусловленными деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления оптического кабеля. Собственные потери волоконных световодов состоят в первую очередь из потерь поглощения (α_n) и потерь рассеивания α_p . Под кабельными потерями понимают потери энергии на макроизгибы и микроизгибы.

В световодах при передаче импульсных сигналов после прохождения некоторого расстояния импульсы искажаются, расширяются и наступает момент, когда соседние импульсы перекрывают друг друга. Данное явление в теории световодов носит название дисперсии.

Расширение импульсов устанавливает предельные скорости передачи информации по световоду при импульсно-кодовой модуляции и при малых потерях ограничивает длину участка регенерации. Дисперсия ограничивает также пропускную способность волоконно-оптических систем передачи, которая предопределяет полосу частот, пропускаемую световодом, ширину линейного тракта и соответственно объем информации, который можно передать по оптическому кабелю.

Дисперсия возникает по двум причинам: некогерентность источников излучения и появление спектра $\Delta\lambda$, существование большого числа мод.

Первая называется хроматической (частотной) дисперсией, которая делится на материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента преломления материала световода от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена процессами внутри моды и связана со световодной структурой моды. Она характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

Второй вид дисперсии носит название модовой, которая, однако, в одномодовых световодах отсутствует полностью.

В одномодовых световодах проявляются материальная и волноводная дисперсии.

На проектируемой линии связи будем использовать высокотехнологичные волокна типа G.652 с рабочей длиной волны 1310 нм, т.к. их характеристика больше всего подходит для проектируемой ВОЛС.

3.2 Выбор способа прокладки ВОК.

Оптические кабели могут прокладываться:

- прямо в грунт в полосе отвода или в тело земляного полотна железной дороги;
- в кабельной канализации или полиэтиленовых трубопроводах;
- по техническим эстакадам;
- в кабельных желобах различной конструкции.

Кроме того, оптические кабели могут быть подвешены на опорах контактной сети, опорах высоковольтно-сигнальных линий автоблокировки и отдельных столбах.

Прокладка кабелей в трубопроводах имеет следующие преимущества:

- наибольший срок службы оптических кабелей;
- лучшую защиту от механических повреждений, чем бронированные кабели при непосредственной прокладке в грунт;
- возможность замены кабеля без выполнения земляных работ, (например, при необходимости увеличения числа волокон или ремонте);

- возможность укладки резервного кабеля в обход поврежденного участка (при наличии резервной трубки);

- возможность предоставления права прохода для кабельных линий других операторов;

- возможность разделения суммарного трафика по отдельным видам с передачей каждого из них по разным оптическим кабелям, например, по одному кабелю передавать международный трафик, по другому - магистральной связи, по третьему - технологической связи и т.д.;

- выполнение работ по прокладке кабеля при новом строительстве и реконструкции связи по мере надобности и поступления кабелей.

Указанные преимущества прокладки ВОК в предварительно проложенный трубопровод особенно важны для трасс, имеющих многочисленные пересечения подземных коммуникаций, рек и водотоков, проходящих по местности и требующих сезонности работ.

Альтернативным способом прокладки кабеля по данной трассе является его подвеска на опорах контактной сети. Этот способ прокладки требует меньше затрат на строительные-монтажные работы и имеет более короткий срок строительства по сравнению с непосредственной прокладкой в грунт и полиэтиленовые трубопроводы.

Заметим, что при прокладке полиэтиленовых трубопроводов с применением кабелеукладчиков не происходит удорожания стоимости строительства ВОЛС по сравнению с подвеской на опорах контактной сети самонесущего оптического кабеля или прокладкой ВОК прямо в грунт. Это объясняется меньшей стоимостью ВОК при прокладке в трубопроводе по сравнению со стоимостью кабеля, прокладываемого непосредственно в грунт или подвесным самонесущим кабелем, хотя прокладка кабеля в трубопроводе требует двухэтапности производства работ: сначала выполняют прокладку трубопровода, а затем затягивание в него ВОК.

Эксплуатационные расходы на содержание кабеля, подвешенного на опорах контактной сети выше, чем при прокладке в трубопроводах

за счет того, что обслуживание подвешенного кабеля выполняется работниками двух служб: связи и электроснабжения, а также тем, что при производстве работ, связанных с заменой опор контактной сети и обслуживанием высоковольтных линий продольного электроснабжения, требуется одновременное присутствие работников обеих служб.

Прокладка кабелей в трубопроводах повышает надежность работы кабельных линий, увеличивает срок службы оптических кабелей. Мировой опыт эксплуатации кабелей показал, что кабели в трубопроводах повреждаются значительно реже, чем подвесные кабели. При укладке трубок в грунт устраняются причины повреждения подвесных кабелей на опорах контактной сети: разрушение опор контактной сети из-за коррозии арматуры или аварий, возникающих при производстве работ по выборочной или сплошной замене опор контактной сети, пожары, прострелы кабеля охотниками, разрывы ОКС машинами и механизмами служб электроснабжения и пути.

Подводя итог, выбираем способ прокладки ВОК в полиэтиленовых трубах в грунте.

3.3 Конструкция выбранного ВОК и его характеристики

Оптический кабель (ОК) представляет собой совокупность оптических волокон (ОВ), заключенных в общую влагозащитную оболочку, поверх которой в зависимости от условий эксплуатации могут быть наложены защитные покровы. Основной задачей оптического кабеля является обеспечение требуемого качества передачи при соответствующих условиях передачи.

К ним, как и к традиционным электрическим кабелям связи, предъявляются следующие требования:

- возможность прокладки в тех же условиях, в каких прокладываются электрические кабели связи;
- использование при прокладке методов, техники и оборудования, применяемых при прокладке электрических кабелей;
- возможность монтажа в полевых условиях;

- устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям в процессе строительства и эксплуатации;

- эксплуатационная надежность с заданными показателями безотказности, долговечности и ремонтпригодности [8 - 45с.]

При выборе оптического кабеля будем руководствоваться РД 45.120-2000 «Нормы технологического проектирования. Городские и сельские телефонные сети»:

- для линейных сооружений местных сетей связи выбор типа и марки кабеля, а также его емкости, должен производиться в зависимости от назначения кабельной линии, условий прокладки в соответствии с ТУ и ГОСТами, на основании технико-экономических показателей;

- область применения кабеля определяется климатической зоной в зависимости от суммы среднемесячных отрицательных температур воздуха, исчисляемых за год в соответствии с ГОСТ 16350-80 "Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей";

- на соединительных линиях сетей связи применяются оптические кабели (ОК) с длинами волн 1300/1550 нм с одномодовыми оптическими волокнами (ОВ);

- на всей длине элементарного кабельного участка должен применяться только один тип оптических волокон и, предпочтительно, одного производителя;

- оптические параметры ОВ должны соответствовать требованиям ТУ на оптические кабели;

- конструкции оболочек и защитных покровов должны обеспечивать прокладку ОК в различных условиях (в кабельной канализации, непосредственно в грунте, на переходах через водные преграды, подвески на опорах воздушных линий связи и ЛЭП).

В соответствии с заданным числом каналов магистральной связи и типом волоконно-оптической системы передачи определим число волокон

ОК. При использовании мультиплексов FG-FOM10GL2 необходимо два волокна: одно для организации каналов связи в прямом направлении, а другое – в обратном направлении связи. Для обеспечения резервирования и защиты, а также с учетом дальнейшего развития данной линии связи общее число волокон составляет 8.

В настоящее время обладателями 16 сертификатов на производство оптических кабелей являются 11 отечественных предприятий и заводов: «Экспо-кабель» г. Подольск; ЗАО «Оптен» и АО «Севкабель-Оптика» г. Санкт-Петербург; АО НФ «Электропровод», СП «Эликс-МО», ЗАО «Оптика-кабель», ЗАО «Москабельмет» г. Москва; АО «Яуза-кабель» г. Мытищи, Московская обл.; ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания» г. Самара, ЗАО «Воронежтелекабель» г. Воронеж; ЗАО «Трансвок» г. Калуга.

Остановим свой выбор на продукции ЗАО «Оптен». Предприятие изготавливает оптические кабели (магистральные, внутризоновые, городские по номенклатуре ТУ 3587-007-13173860-98. Маркировка кабелей ЗАО «Оптен» представлена в таблице 3.2.

Табл.3.2. Маркировка волоконно-оптических кабелей производства «Оптен»

ОПН	-	Д	П	О	-	05	-	008	С	02	-	14,0	
													Длительно допустимая растягивающая нагрузка, кН
													Максимальное число оптических волокон в модуле
													Тип оптического волокна: Е – стандартное одномодовое; С – одномодовое со смещенной дисперсией; Н – одномодовое с ненулевой смещенной дисперсией; Г – многомодовое градиентное (диаметр сердцевины 50 мкм); М – многомодовое градиентное (диаметр сердцевины 62 мкм);

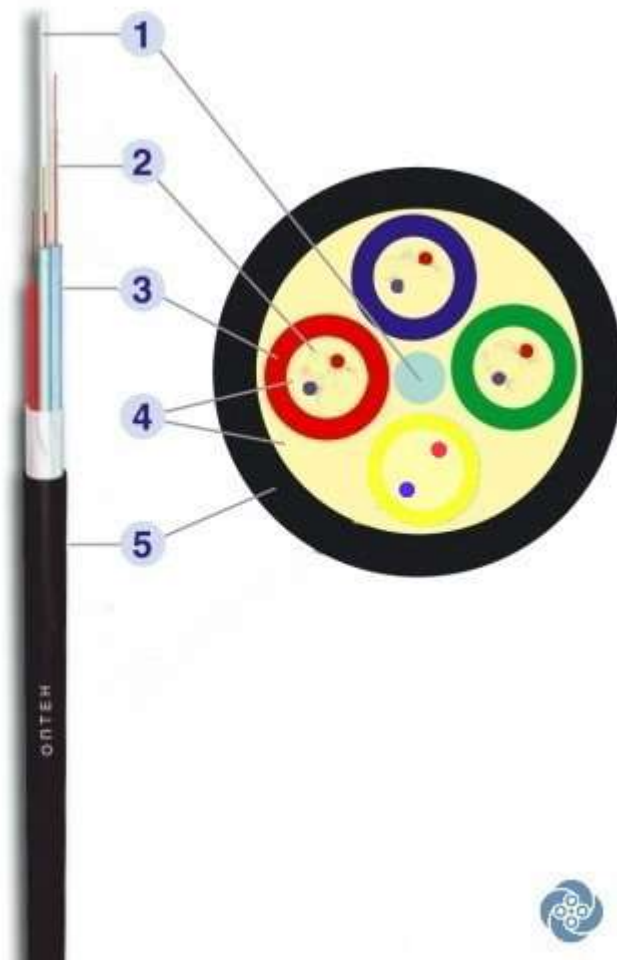
Продолжение табл. 3.2.

ОПН	-	Д	П	О	-	05	-	008	С	02	-	14,0	
-----	---	---	---	---	---	----	---	-----	---	----	---	------	--

								Число оптических волокон в кабеле
								Число элементов в повиве сердечника
								<p>Тип защитного покрова:</p> <p>С – однослойная броня из стальных проволок и наружная полиэтиленовая оболочка;</p> <p>Н – однослойная броня из стальных проволок и наружная оболочка из материала, не распространяющего горение;</p> <p>Г – однослойная броня из стальных проволок и наружная оболочка из галогенонесодержащего материала, не распространяющего горение;</p> <p>М – несущие силовые элементы из диэлектрических стержней и наружная полиэтиленовая оболочка;</p> <p>К – несущие силовые элементы из диэлектрических стержней и наружная оболочка из дугостойкого материала;</p> <p>2 – двухслойная броня из стальных проволок и наружная полиэтиленовая оболочка;</p> <p>Т – несущие силовые элементы из арамидных прядей и наружная полиэтиленовая оболочка;</p> <p>Р – несущие силовые элементы из арамидных прядей и наружная оболочка из дугостойкого материала;</p> <p>О – без защитного покрова</p>
								<p>Тип внутренней оболочки</p> <p>П – полиэтиленовая;</p> <p>В – из материала повышенной теплостойкости;</p> <p>Н – из материала, не распространяющего горение;</p> <p>Г – из галогенонесодержащего материала, не распространяющего горение;</p> <p>А – двухслойная водоблокирующий слой из алюминиевой ленты с полимерным покрытием и слой из полиэтилена;</p> <p>О – без внутренней оболочки</p>
								<p>Тип центрального силового элемента</p> <p>Д – диэлектрический;</p> <p>С – стальной;</p> <p>Т – трубчатый сердечник</p>

Из таблицы 3.2. выберем кабель марки ОПН-ДПО-04-08С2-14,0.

На рисунке 3.1 представлена конструкция кабеля ОПН-ДПО-04-08С2-



Конструкция:

1. Центральный силовой элемент:
 - диэлектрический
 - стальной
2. Оптическое волокно (от 2 до 12)
3. Оптический модуль (от 1 до 4)
4. Гидрофобный гель
5. Наружная оболочка:
 - полиэтиленовая

Рис.3.1. Конструкция кабеля ОПН-ДПО-04-08С2-14,0

Из рисунка 3.1. видно, что выбранный кабель для проектируемой ВОЛС Киров - Шарья имеет диэлектрический центральный силовой элемент

с полиэтиленовой внутренней оболочкой без защитного покрова с 8 одномодовыми оптическими волокнами со смещенной дисперсией. Данный кабель выбран без защитного покрова в связи с тем, что он будет проложен на протяжении всей трассы в заранее проложенную ЗПТ (полиэтиленовую защитную трубу), после, данный кабель пневмоспособом будет проложен в ЗПТ. Данный способ прокладки позволяет повысить степень защиты ВОК от вибрационных и механических напряжений, возникающих в результате деформации грунта. Так же наличие ЗПТ позволит сократить расходы на обслуживание данной трассы ВОЛС и сократит время на устранение повреждений, т.к. избавит обслуживающий персонал от масштабных земляных работ при замене определенного участка поврежденного кабеля. Данный метод строительства позволит в случае необходимости доложить ВОК в существующую ЗПТ.

Глава 4 Расчет длин участков регенерации и проверка бюджета ВОЛС

4.1 Расчет длины регенерационного участка.

При проектировании ВОЛС рассчитываются отдельно длина участка по затуханию (L_a) и длина участка регенерации по широкополосности ($L_{ш}$), т.к. причины ограничивающие предельные значения указанных длин независимы.

В общем случае целесообразно рассчитывать две величины участка регенерации по затуханию:

$L_{a \max}$ – максимальная проектная длина участка регенерации;

$L_{a \min}$ – минимальная проектная длина участка регенерации.

Для оценки этих величин используются выражения:

$$L_{\alpha \max} = \frac{(A_{\max} - M - n \cdot A_{pc})}{\alpha_{ок} + \frac{A_{нс}}{L_{стр}}} \quad (4.1.)$$

$$L_{\alpha \min} \geq \frac{A_{\min}}{\alpha_{ок} + \frac{A_{нс}}{L_{стр}}} \quad (4.2.)$$

$$L_{ш} \leq \frac{4,4 \cdot 10^5}{D \cdot d \cdot B} \quad (4.3.)$$

где: A_{\max} , A_{\min} – максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания аппаратуры ВОСП, обеспечивающее к концу срока службы значение ВВЕР не более $1 \cdot 10^{-10}$,

$\alpha_{ок}$ (дБ/км) – километрическое затухание в оптических волокнах кабеля,
 $A_{нс}$ (дБ) – среднее значение затухания мощности оптического излучения неразъемного оптического соединителя на стыке между строительными длинами кабеля на участке регенерации,

$L_{стр}$ (км) – среднее значение строительной длины кабеля на участке регенерации,

A_{pc} (дБ) – затухание мощности оптического излучения разъемного оптического соединителя,

n – число разъемных оптических соединителей на участке регенерации,

D (пс/нм·км) – суммарная дисперсия одномодового оптического волокна,

d (нм) – ширина спектра источника излучения,

B (МГц) – широкополосность цифровых сигналов, передаваемых по оптическому тракту,

M (дБ) – системный запас ВОСП по кабелю на участке регенерации.

Максимальное значение перекрываемого затухания A_{\max} :

$$A_{\max} = P_{\text{пдmin}} - P_{\text{чувст.пр}} \quad (4.4.)$$

где: $P_{\text{пдmin}}$ – минимальная мощность излучения передатчика;

$P_{\text{чувст. пр.}}$ – гарантированная чувствительность приемника;

Минимальное значение перекрываемого затухания A_{\min} :

$$A_{\min} = P_{\text{пдmax}} - P_{\text{пер.пр}} \quad (4.5.)$$

где: $P_{\text{пдmax}}$ – максимальная мощность излучения передатчика;

$P_{\text{пер. пр}}$ – уровень перегрузки приемника.

Системный запас (M) учитывает изменение состава оптического кабеля за счет появления дополнительных (ремонтных) вставок, сварных соединений, а также изменение характеристик оптического кабеля, вызванных воздействием окружающей среды и ухудшением качества оптических соединителей в течение срока службы, и устанавливается при проектировании ВОСП, исходя из ее назначения и условий эксплуатации оператором связи, в частности, исходя из статистики повреждения (обрывов) кабеля в зоне действия оператора.

Рекомендуемый диапазон устанавливаемых значений системного запаса от 2дБ (наиболее благоприятные условия эксплуатации) до 6дБ (наихудшие условия эксплуатации).

Таким образом, исходя из технических характеристик аппаратуры и параметров ОК имеем следующие данные:

$$A_{\max} = 25 \text{ дБм};$$

$$A_{\min} = 23 \text{ дБм};$$

$$\alpha_{pc} = 0,1 \text{ дБ};$$

$$\alpha_{nc} = 0,1 \text{ дБ};$$

$$\alpha_{ок} = 0,34 \text{ дБ/км};$$

$$L_{стр} = 4 \text{ км};$$

$$D = 18 \text{ пс/нм} \cdot \text{км};$$

$$M = 2 \text{ дБ}$$

$$n = 4;$$

$$B = 2500 \text{ МГц}$$

Тогда:

$$\text{Максимальная длина РУ: } L_{\alpha \max} \leq \frac{25 - 2 - 4 \cdot 0,1}{0,34 + \frac{0,1}{6}} = 68 \text{ км};$$

$$\text{Минимальная длина РУ: } L_{\alpha \min} \leq \frac{23}{0,34 + \frac{0,1}{6}} = 64 \text{ км};$$

Длина участка регенерации по широкополосности:

$$L_{ш} > \frac{4,4 \cdot 10^5}{18 \cdot 2,5 \cdot 2448,32} = 399 \text{ км};$$

По результатам расчетов получено, что $L_{ш} > L_{\alpha \max}$ ($399 \text{ км} > 68 \text{ км}$) значит, аппаратура и кабель выбраны с техническими данными, обеспечивающими запас по широкополосности на участке регенерации.

4.2 Оценка бюджета ВОЛС.

Реально существует вполне конкретная длина участка сети между населенными пунктами или узлами связи. Эта длина может быть как больше расчетной максимальной, так и меньше. Структура ВОЛС – окончные пункты, пункты выделения, ответвления потоков, определённые в техническом задании, могут быть расположены самым неопределенным, но вполне конкретным образом. Это приводит к появлению еще одной оценки длина участка, а именно бюджета ВОЛС, который связывает характеристики предполагаемой к использованию аппаратуры и параметров передачи ВОЛС.

Любая аппаратура, предназначенная для организации цифровых потоков того или иного уровня иерархии имеет в составе прочих выходные – входные характеристики. Прежде всего, к ним относятся уровни мощности оптического излучения и закон её изменения в процессе эксплуатации на рабочей длине волны, а также чувствительность приемника и его перегрузочная способность, т.е. динамический диапазон работы аппаратура.

Учитывая тот факт, что при использовании одномодовых оптических волокон, у которых потери очень невелики, суммарное затухание ВОЛС может оказаться гораздо меньше, чем этого требует динамика работы аппаратуры, что приведет к существенному росту параметров ошибок.

Количественно бюджет линии можно оценить следующим образом.

$$(P_{\text{ИЗЛ.МАКС}} - \Delta P_{\text{ИЗЛ}}) - P_{\text{ПР.МИН}} \geq \alpha L_{\text{ПУ}} + \Delta a \geq (P_{\text{ИЗЛ.МАКС}} - \Delta P_{\text{ИЗЛ}}) - P_{\text{ПР.МАКС}}$$

(4.6.)

где:

$$\Delta P_{\text{ИЗЛ}} = P_{\text{ИЗЛ.МАКС}} - P_{\text{ИЗЛ.МИН}} ;$$

(4.7.)

Отсюда следует:

$$P_{\text{ИЗЛ.МАКС}} = 0 \text{ дБм};$$

$$P_{\text{ИЗЛ.МИН}} = -5 \text{ дБм};$$

$$P_{\text{ПР.МАКС}} = 0 \text{ дБм};$$

$$P_{\text{ПР.МИН}} = -34 \text{ дБм};$$

$$\Delta a = 10 \text{ дБм};$$

Подставляя данные в выражение получаем:

$$-5 - (-34) \geq 18 \geq -5 - 0$$

По бюджетной оценке ВОЛС соответствует требованиям.

Раздел 3. Система технической эксплуатации линейных сооружений связи. Структура системы. Теоретические основы построения системы технической эксплуатации ВОЛС.

Успешно завершив первые два этапа – проектирование ВОЛС как новое, так создание различных вариантов проектов реконструкции существующих металлических или волоконно-оптических линий связи, последующее строительство ВОЛС или выполнение работ по реконструкции, неизбежно происходит переход к следующему этапу – построению новой системы технической эксплуатации линейных сооружений связи (СТЭЛСС).

Этот этап является наиболее ответственным, с точки зрения, создания условий нормального функционирования объекта эксплуатации, обеспечении всех качественных и количественных характеристик последнего, при этом, необходимо помнить о затратах, необходимых для поддержания объекта в постоянной работоспособности

Задача оптимизации построения СТЭЛСС может быть решена на основе анализа так называемых «Больших систем» (БС) характеризующихся множеством состояний, огромным набором входных и выходных параметров, между которыми имеются функциональные и статистические зависимости. Прежде всего, необходимо рассмотреть, насколько линейные сооружения связи (ЛСС) удовлетворяют основным признакам БС.

«Система создана человеком из различного вида оборудования и сырья» - этому признаку полностью удовлетворяют все типы трактов и ЛСС.

«Система обладает цельностью - все ее части и элементы служат достижению единой цели – выработке определенной продукции с помощью набора оптимизированных выходов при заданных входных воздействиях». ЛСС и тракты КМ предназначены для единой цели – передачи возможно большего объема информации с заданным качеством при оптимизированных, по определенным критериям, конструктивных и стоимостных параметрах и ограниченных входных и выходных воздействиях внутренних и внешних факторов, т.е. полностью соответствуют этому признаку.

«Система является большой как с точки зрения разнообразия ее элементов, так и с точки зрения одинаковых частей и выполняемых ими функций». ЛСС и тракты КМ состоят из большого числа строительных длин кабеля единых по своей структуре, различного рода активного оборудования одинаковых для конкретного тракта и выполняющих одинаковые функции.

«Система является сложной». Это означает, что изменение какой-либо переменной влечет за собой изменение многих других переменных, причем подобная зависимость редко является линейной и часто носит стохастический характер. ЛСС и тракты КМ более чем полно отвечают данному признаку. Изменения температуры грунта, воздействия внешних факторов, изменения характеристик оборудования (например, деградация источника излучения), приводят к случайным изменениям функциональных характеристик всей системы, колебаниям коэффициента ошибок в цифровых трактах и пр.

«Система является полуавтоматической». Это означает, что часть функций системы выполняется автоматически, а часть – человеком, что, несомненно, происходит в процессе эксплуатации, контроля и ремонтно-восстановительных работах на любых линиях связи.

«Входные воздействия системы имеют стохастическую природу». Отсюда следует невозможность полного предсказания поведения системы для любого момента времени. Применительно к ЛСС и трактам КМ это означает случайный характер возникновения отказов, невозможность точного определения в каждый момент времени загрузки тракта и пр.

«Большинство систем и в первую очередь наиболее сложные системы содержат элементы конкурентной ситуации». В нашем случае в процессе проектирования приходится рассматривать несколько вариантов от простой замены оборудования до строительства новых волоконно-оптических линий, чтобы обеспечить передачу заданного объема информации с требуемым качеством, а также возможность увеличения трафика в процессе развития.

3.1. Принципы системного подхода к анализу СТЭЛСС.

Задача оптимизации больших систем по определенным критериям сложна, поэтому обычно ее разбивают на ряд направлений в идеологическом, организационном и реализационном планах. Подобные методы деления не должны допускать взаимные непрерывные переходы, т.е. они должны представлять собой ортогональные векторы в пространстве системы.

Для систем ЛСС возможно следующее деление:

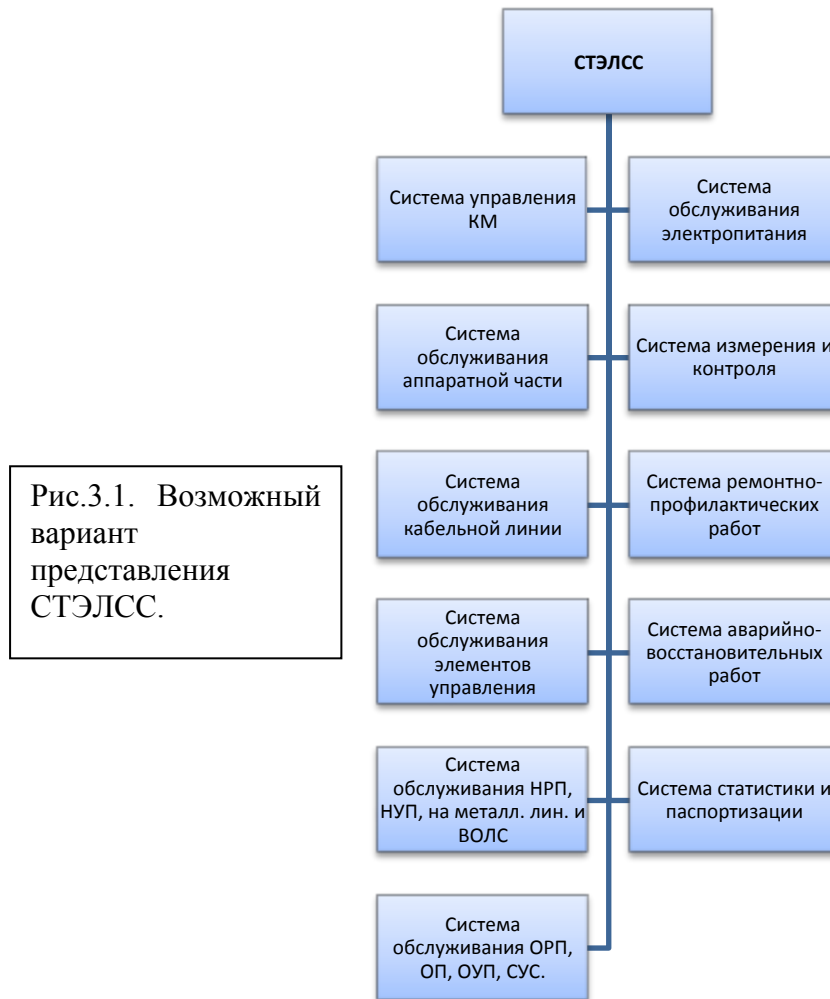
- аппарат для анализа и конструирования СТЭЛСС. В качестве этого аппарата используются разделы математического анализа, необходимые при исследовании параметров передачи, помех и возмущений действующих на ЛСС, математические методы исследования операций и, в частности, методы оптимизации параметров систем, различные способы построения математических моделей систем и оценке степени адекватности этих моделей создаваемым системам.
- фазы или периоды (во времени) и этапы (логические) конструирования СТЭЛСС.

Применение подобного разбиения позволяет расчленить задачу оптимизации на ряд «фаз» и «этапов» по времени проведения работы либо по ее логической последовательности. В действительности это разбиение часто не соблюдается, а иногда, например, при ограниченном времени создания системы ряд «этапов» и «фаз» выполняются одновременно или в другом порядке. Очень часто, например, при анализе надежности кабельных магистралей или путей повышения эффективности и качества их работы рассматриваются различные фазы и периоды эксплуатации КМ, а также возможности ее оптимизации по мере создания новых, более совершенных методов эксплуатации.

- подсистемы. Каждый линейный тракт или ЛСС могут рассматриваться как подсистема более крупной системы, например первичной сети. Расчленение сложных систем на подсистемы производится до тех пор, пока не будут получены

элементы системы, т.е. такие объекты, которые в условиях данной задачи не подлежат расчленению. Однако при использовании и оптимизации таких объектов необходимо учитывать, что в исходной системе они функционируют во взаимодействии друг с другом и свойства БС определяются не только свойствами данных объектов, но и характером их взаимодействия в структуре БС.

Возможное расчленение СТЭЛСС на подсистемы может быть представлено в виде следующей структуры (рис.3.1.)



3.2. Критерии эффективности СТЭЛСС и моделирование процессов в системе

Можно выделить следующие основные этапы работ при определении критерия эффективности СТЭЛСС:

- анализ основных свойств заданного или выбираемого критерия эффективности;
- оценка сложности исходной функции, связывающей данный критерий с варьируемыми параметрами;
- определение возможности контроля за достижением и сохранением оптимального состояния ЛСС на оптимизируемой фазе;

- разработка методов, устройств и подсистем, обеспечивающих целесообразную или достижимую степень улучшения критерия эффективности работы СТЭЛСС;
- оценка эффективности по качеству и внедрение полученных рекомендаций в СТЭЛСС.

Одним из важнейших критериев оценки СТЭЛСС является оценка эффективности по качеству. Он имеет важное значение не только потому, что в существенной мере определяет целесообразность оптимизации системы по этому критерию, но и позволяет сопоставить и оценить эффективность ортогональных между собой критериев эффективности по значению ожидаемого экономического эффекта.

Понятие оптимизации «по качеству» в первую очередь относится к системам высокой стоимости и длительного срока работы, к которым, несомненно, принадлежат и СТЭЛСС. В этой системе с течением времени наблюдается моральное старение отдельных подсистем, устройств, технологий, что приводит к ухудшению параметров системы в целом. Проектные решения, как по созданию новых участков сети с заданной пропускной способностью, так и реконструкция существующих, придают новые свойства СТЭЛСС, которые должны обеспечить повышение ее эксплуатационных характеристик при увеличении пропускной способности линий связи, сокращение времени проведения ремонтно-восстановительных работ. Оптимизацию в этом случае можно рассматривать как дискретный, итерационный процесс, при котором с каждым шагом итерации, соответствующим повышению эффективности и качества работы СТЭЛСС, происходит приближение системы к оптимальному состоянию.

Таким образом, с каждым итерационным шагом образуется новая модель, в которой большинство подсистем может оставаться неизменными или изменяться частично, а одна или несколько подсистем изменяются существенно, придавая модернизируемой системе главные отличительные признаки.

Многие случайные процессы, протекающие в ЛСС, особенно в линейных трактах и кабельных линиях, с достаточно высокой степенью приближения можно отнести к Марковским процессам, или процессам без последствия. Они обладают следующими свойствами - для каждого момента времени t_0 , вероятность любого состояния системы в момент $t > t_0$ зависит только от ее состояния при $t = t_0$ и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние.

Действительно, пусть необходимо оценить в будущем качество работы некоторой СТЭЛСС, находившейся длительное время в эксплуатации и характеризующейся определенной степенью изношенности. Очевидно, что вероятность любого состояния системы зависит только от ее состояния в настоящем времени при $t = t_0$ и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние.

Процессы, происходящие в ЛСС, обычно относят к Марковским процессам с дискретным состоянием и непрерывным временем.

Допустим, что СТЭЛСС имеет ряд дискретных, случайных состояний $S_1, S_2 \dots S_n$. Например, S_1 – кабельная магистраль исправна, S_2 – в одном из трактов каналы имеют пониженное качество (увеличенный уровень шумов в аналоговых системах, увеличение коэффициента ошибок в цифровых), S_i – полный отказ одного из трактов, S_n – полный отказ всех трактов.

Переход системы S в различные состояния может осуществляться в любой момент времени. События $S_1, S_2 \dots S_n$ несовместимы и образуют полную группу состояний, так что сумма вероятностей $p_i(t)$ – вероятность того, что в момент времени t система будет находиться в состоянии S_i и для любого момента времени равна единице:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad 3.1.$$

Пусть вероятность перехода системы из состояния i в состояние j известна и равна p_{ij} . Тогда можно ввести понятие о плотности вероятности перехода:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} [p_{ij}(t) / (\Delta t)] \quad 3.2.$$

Зная плотности вероятностей перехода для системы, можно составить так называемый граф состояния системы, например для $n=5$ (рис.4.2.).

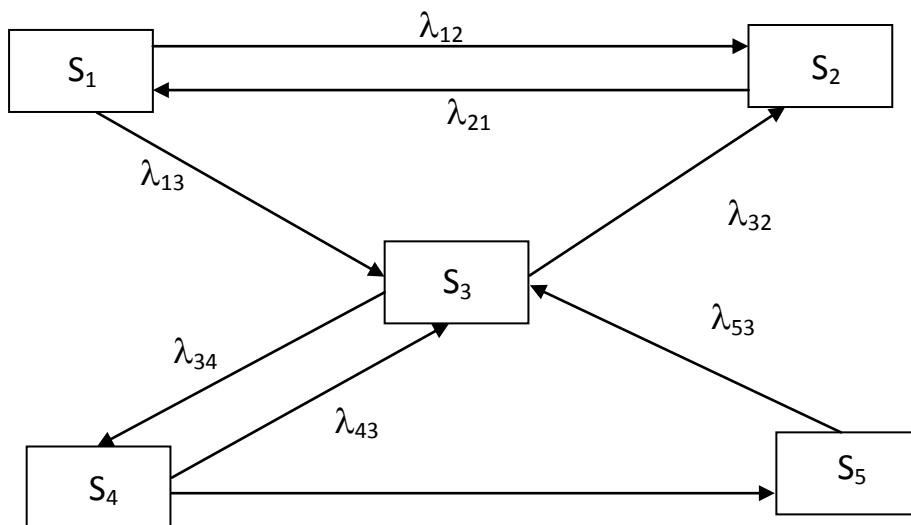


Рис.3.2. Размеченный граф состояний

Если все плотности вероятностей перехода λ_{ij} не зависят от t , то Марковский процесс называется однородным; если эти плотности представляют собой какие-то функции времени $\lambda_{ij}(t)$, процесс называют неоднородным. В последнем случае часто заменяют $\lambda_{ij}(t)$ его математическим ожиданием

$$M[\lambda_{ij}(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda_{ij}(t) dt, \quad 3.3.$$

где,

- T - рассматриваемый интервал времени.

В результате неоднородный процесс сводится к однородному.

Зная размеченный граф, можно определить вероятности $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ из дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Колмогорова, составляемых по следующему правилу: левая часть каждого уравнения состоит из производной вероятности состояния, а правая часть содержит столько членов, сколько стрелок размеченного графа связано с данным состоянием. Если стрелка направлена из состояния, соответствующий член имеет знак минус, если в состояние – знак плюс. Каждый член равен произведению плотности вероятности перехода, соответствующей данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка.

Рассмотрим типичную, для многих процессов, протекающих в СТЭЛСС, а именно, непрерывную Марковскую цепь, называемую схемой «гибели и размножения».

Граф этой цепи представлен на рис.3.3. и имеет вид вытянутой цепочки, в которой каждое из соседних состояний (S_2, S_3, \dots, S_{n-1}) связано прямой и обратной связями с каждым из соседних состояний, а крайние состояния (S_1, S_n) – только с одним соседним состоянием.

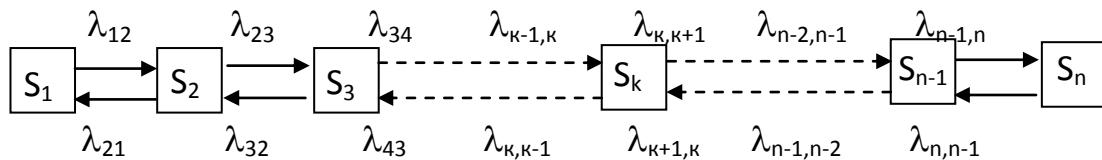


Рис.3.3. Граф процесса «гибели и размножения».

Алгебраические уравнения предельных вероятностей состояния для такого графа имеют следующий вид:

для состояния S_1

$$\lambda_{12} p_1 = \lambda_{21} p_2, \quad (3.4.)$$

для состояния S_2

$$\lambda_{12} p_1 + \lambda_{32} p_3 = (\lambda_{23} + \lambda_{21}) p_2. \quad (3.5.)$$

Аналогично можно найти

$$\lambda_{k-1,k} p_k = \lambda_{k,k-1} p_{k-1} \quad (3.6.)$$

Пользуясь уравнениями типа (4.6.) можно составить выражение для вычисления предельной вероятности состояния p_1 и уравнение связи для расчета остальных вероятностей:

$$p_1 = [1 + \lambda_{12}/\lambda_{21} + (\lambda_{23} \lambda_{12}) / (\lambda_{32} \lambda_{21}) + \dots + (\lambda_{k-1,k} \lambda_{k-2,k-1} \lambda_{12}) / (\lambda_{k,k-1} \lambda_{k-1,k-2} \dots \lambda_{21}) + (\lambda_{n-1,n} \dots \lambda_{12}) / (\lambda_{n,n-1} \lambda_{21})]^{-1} \quad (3.7.)$$

и

$$p_2 = (\lambda_{12}/\lambda_{21}) p_1; \quad p_3 = (\lambda_{23} \lambda_{12}) / (\lambda_{32} \lambda_{21}) p_1; \dots \quad (3.8.)$$

$$p_n = (\lambda_{n-1,n} \dots \lambda_{12}) / (\lambda_{n,n-1} \lambda_{21}) p_1$$

В качестве примера рассмотрим реконструированный линейный тракт

кабельной магистрали, который состоит из трех трактов цифровой системы передачи (ЦСП) типа РСМ – 480. Поток отказов простейший, распределен по показательному закону и обладает тремя свойствами:

- стационарностью;
- ординарностью (события в потоке происходят по одиночке);
- отсутствием последействия (т.е. число событий, приходящихся на один отрезок времени, не зависят от того, сколько событий попало на другой отрезок времени).

Среднее время безотказной работы каждого тракта равно $T_{б,ср.}$.

Ремонт отказавшего тракта начинается немедленно (это самый дорогой вариант) при этом:

- среднее время ремонта (восстановления) равно $T_{в,ср.}$;
- закон распределения этого времени – показательный, поток восстановления – простейший.

Найти среднюю производительность кабельной магистрали, если при трех работающих трактах она равна 100%, при двух – 80%, при одном - 50%, а при выходе из строя всех трактов – магистраль не работает.

Возможные состояния системы нумеруем по числу неисправных трактов: S_0 – все тракты исправны; S_1 – один тракт отказал и восстанавливается; S_2 – два тракта восстанавливаются один исправен; S_3 – три тракта восстанавливаются, магистраль не работает. Построим и разметим граф состояний (рис.4.4.). Вправо систему переводят отказы. Если система находится в состоянии S_0 , т.е. все тракты работают и каждый из них подвержен потоку отказов с интенсивностью $\lambda = 1/T_{б,ср.}$, то общий поток отказов будет в три раза больше: $\lambda_{01} = 3/T_{б,ср.}$. При выходе из строя одного тракта (состояние S_1) интенсивность потока отказов : $\lambda_{12} = 2/T_{б,ср.}$; при выходе из строя двух трактов (состояние S_2) $\lambda_{23} = 1/T_{б,ср.}$.

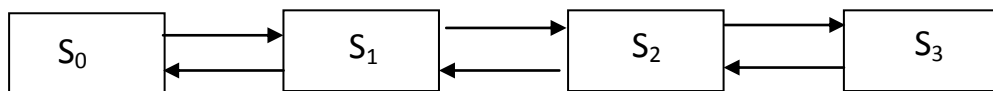


Рис.3.4. Размеченный граф состояний.

Влево систему переводят ремонты (работа СТЭЛСС) трактов. Из состояний S_2, S_3 система переводится с интенсивностью $\lambda_{32} = 3/T_{в,ср.}$ ($T_{в,ср.}$ – среднее время восстановления трактов, ремонтируются все три тракта). Аналогично получаем : $\lambda_{21} = 2/T_{в,ср.}$ и : $\lambda_{10} = 1/T_{в,ср.}$.

Воспользовавшись уравнениями (3.7.), (3.8.) и заменив индексы, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = 1/[1+3(T_{в,ср.}/ T_{б,ср.})+3(T_{в,ср.}/ T_{б,ср.})^2+(T_{в,ср.}/ T_{б,ср.})^3]; \\ P_1 = 3(T_{в,ср.}/ T_{б,ср.}) P_0 ; \\ P_2 = 3(T_{в,ср.}/ T_{б,ср.})^2 P_0; \\ P_3 = (T_{в,ср.}/ T_{б,ср.})^3 P_0 . \end{array} \right. \quad (3.9.)$$

Средняя производительность кабельной магистрали в установившемся режиме:

$$A_{\text{ср.}} = P_0 + 0,8 P_1 + 0,5 P_2 \quad (3.10.)$$

Вычислим значения P_i и $A_{\text{ср.}}$ задавшись конкретными цифрами. Положим $(T_{\text{в,ср.}} / T_{\text{б,ср.}}) = 4 * 10^{-2}$, $T_{\text{в,ср.}} = 4,5$ ч.

Тогда,

$$P_0 = 1 / (1 + 0,12 + 0,0048 + 0,64 * 10^{-4}) = 0,889;$$

$$P_1 = 0,107;$$

$$P_2 = 4,27 * 10^{-3};$$

$$P_3 = 8,9 * 10^{-7};$$

$$A_{\text{ср.}} = 97,67\%.$$

Эти цифры говорят о том, что в данном примере СТЭЛСС на 98% справляется со своей задачей. Однако встает вопрос – от чего зависят вероятности, приведенные в данном примере, и как это будет выглядеть в других вариантах при значительно более высоких нагрузках трактов, особенно ВОЛС.

3.3. Основные задачи и параметры системы эксплуатации ЛСС.

Основной задачей СТЭЛСС и линейных трактов является обеспечение бесперебойной работы трактов и каналов связи при заданном количестве и качестве передаваемой информации и минимальных эксплуатационных расходах. Эта задача решается в условиях воздействия на ЛСС различных дестабилизирующих факторов, приводящих к появлению неисправностей, ухудшению качества передаваемой информации, отказом действия связи в части каналов, отдельных трактов или полному прекращению связи на данном участке сети. При любом отказе в системе эксплуатации должно предусматриваться принятие мер по немедленному устранению причин отказа.

Несмотря на разнообразие физических процессов, протекающих в СМО, общим для них является то, что они предназначены для выполнения (обслуживания) некоторых потоков заявок, поступающих в СМО в случайные моменты времени, которые осуществляются с помощью заданного числа обслуживающих единиц, называемых каналами обслуживания.

Назовем потоки отказов, возникающих в ЛСС, потоками заявок, поступающими в СТЭЛСС. Действительно, поток заявок в СТЭЛСС образуется случайным потоком отказов и неисправностей и характеризуется его интенсивностью λ . Поток является случайным Марковским процессом с непрерывным временем и может быть отнесен к простейшим. Это означает, что данный поток заявок не обладает последствием, является стационарным и ординарным, т.е. вероятность попадания на элементарный участок двух и более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного события. Справедливость этого утверждения подтверждается малостью среднего времени восстановления $T_{\text{в,ср.}}$ по сравнению с временем безотказной работы. Время восстановления в

СТЭЛСС является аналогом времени обслуживания СМО, а производительность СТЭЛСС, равная

$$\mu = 1/T_{в,ср}. \quad (3.11.)$$

эквивалентна параметру пропускной способности СМО.

Как известно основной задачей теории СМО является установление зависимости между характером потока заявок, числом каналов, их производительностью, правилами работы СМО и эффективностью обслуживания. Так как в СТЭЛСС каждый отказ (или неисправность) в течение различного времени обязательно устраняются, эти системы должны быть отнесены к СМО с неограниченным ожиданием. Параметрами эффективности таких систем являются:

- среднее время пребывания заявки на обслуживание в очереди – время устранения отказа (неисправности);
- среднее число заявок в очереди;
- среднее число заявок в системе (в очереди и на обслуживании).

Число каналов обслуживания в системе СТЭЛСС зависит от протяженности анализируемой магистрали. В простейшем случае это число равно 1, а в общем случае СТЭЛСС может быть многоканальной.

Одноканальную ($n=1$) СТЭЛСС с интенсивностью потока заявок (отказов) λ и интенсивностью обслуживания μ можно представить в виде размеченного графа состояний (рис.3.5.).

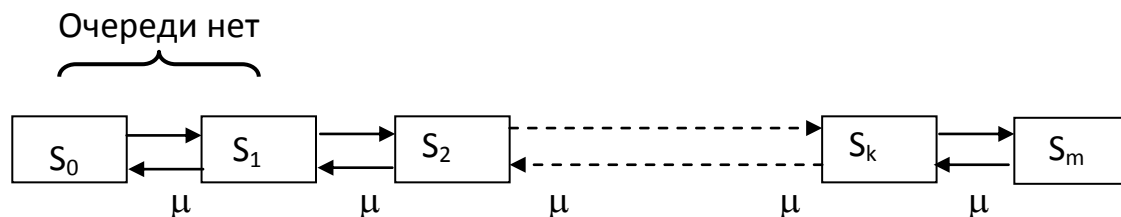


Рис.3.5. Размеченный граф состояний для одноканальной СТЭЛСС.

Пронумеруем состояние СТЭЛСС по числу заявок, находящихся в системе:

- S_0 – канал обслуживания свободен;
- S_1 – канал обслуживания занят, очереди нет;
- S_2 – канал занят, одна заявка стоит в очереди;
- S_k – канал занят, $k-1$ заявок стоят в очереди;
- S_{m+1} – канал занят, m заявок стоят в очереди.

Как видно из рис.3.5., изображенный граф состояний представляет собой схему «гибели и размножения».

Выражения для предельных вероятностных состояний выглядят следующим образом.

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= (1 - \rho)/(1 - \rho^{m+2}); \\ P_1 &= P_0 \rho; \\ P_2 &= P_0 \rho^2; \\ P_{m+1} &= P_0 \rho^{m+2}, \end{aligned} \right\} \quad (3.12.)$$

где,

$\rho = \lambda / \mu$ - коэффициент соотношения между интенсивностью потока отказов и производительностью системы обслуживания, равный

$$\rho = \lambda / \mu = T_{в,ср.} / T_{б.,ср.} \quad (3.13.)$$

Заметим, что при $\rho \ll 1$, когда $T_{в,ср.} \ll T_{б.,ср.}$ вероятность образования очереди в СЭЛСС весьма мала.

Это положение справедливо для полных отказов связи на магистрали. Однако при моделировании процессов в СТЭЛСС для ряда неисправностей, не приводящих к полному закрытию действия связи, или при определении динамических параметров СТЭЛСС значение ρ может быть близким к единице.

Рассмотрим в начале наиболее важный для практики случай полных отказов, когда $\rho \ll 1$. В этом случае при $m \gg 1$ $\rho^{m+2} \rightarrow 0$ и из (3.12.) непосредственно получим:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= 1 - \rho; \\ P_1 &= (1 - \rho) / \rho; \\ P_2 &= (1 - \rho) / \rho^2; \\ P_k &= (1 - \rho) / \rho^k, \end{aligned} \right\} \quad (3.14.)$$

где,

k – номер состояния СТЭЛСС, для которого при заданной погрешности производится расчет значений P .

Определим среднее число заявок в очереди ($R_{ср.}$), умножая число заявок на значение предельной вероятности (4.12.):

$$R_{ср.} = 1P_2 + 2P_3 + \dots + mP_m \approx P_0 \rho^2 (1 + 2\rho + 3\rho^2 + \dots + m\rho^{m-1}). \quad (3.15.)$$

Сумма, стоящая в скобках, представляет собой производную геометрической прогрессии $\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^m$, значение которой равно

$$S = (\rho - \rho^{m+1}) / (1 - \rho). \quad (3.16.)$$

После дифференцирования (1.16.) по ρ получаем

$$S' = [1 - \rho^m(m+1-m\rho)] / (1 - \rho)^2 \quad (3.17.)$$

Подставив (4.17.) в (4.15.), будем иметь

$$R_{ср.} = \frac{\rho^2 [1 - \rho^m(m+1-m\rho)]}{(1-\rho)(1-\rho^{m+2})} \quad (3.18.)$$

Для повреждений с отказом действия связи, когда $\rho^m \rightarrow 0$

$$R_{ср.,отк.} = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (3.19.)$$

В ряде случаев кроме среднего числа заявок в очереди представляет интерес определение общего числа заявок в системе ($K_{ср.}$), которое складывается из заявок в очереди и среднего числа обслуживаемых заявок:

$$K_{ср.} = R_{ср.} + (\rho - \rho^{m+2}) / (1 - \rho^{m+2}), \quad (3.20.)$$

где,

$(\rho - \rho^{m+2})/(1 - \rho^{m+2}) = q_{\text{ср.}}$ – среднее число заявок, находящихся на обслуживании; при $\rho^{m+2} \rightarrow 0$ получаем $K_{\text{ср.,отк.}} = R_{\text{ср.}} + \rho = \rho/(1 - \rho)$.

Среднее время ожидания заявки в очереди ($T_{\text{ср.,ожид.}}$) определяется суммой:

$$T_{\text{ср.,ожид.}} = P_1 1/\mu + P_2 2/\mu + \dots + P_m m/\mu, \quad (3.21.)$$

или после выполнения суммирования путем подстановки значений из (4.12.)

$$T_{\text{ср.,ожид.}} = R_{\text{ср.}} / \rho \mu = R_{\text{ср.}} / \lambda, \quad (3.22.)$$

где,

$R_{\text{ср.}}$ вычисляется по (4.18.).

Для $P_m \rightarrow 0$ в результате подстановки в (3.21.) выражения (3.19.) получим следующую формулу:

$$T_{\text{ср.,ожид.отк.}} = \rho^2 / \lambda (1 - \rho) = \rho / \mu (1 - \rho) \quad (3.23)$$

Среднее время нахождения заявки в системе ($t_{\text{сист.}}$), определяемое временем ожидания и обслуживания,

$$t_{\text{сист.}} = T_{\text{ср.,ожид.}} + 1/\mu = 1/\mu (1 - \rho). \quad (3.24.)$$

Для случая трудно устранимой неисправности ЛСС с сохранением действия связи введем ограничение очереди заявок числом m_1 (максимальное время ожидания). Тогда, как указывалось выше, вероятность отказа выполнения заявки $P_{\text{отк.}}$ появится, если канал занят и заняты все m_1 мест в очереди:

$$P_{\text{отк.}} = P_{m+1} = \frac{\rho^{m+1} (1 - \rho)}{1 - \rho^{m+2}} \quad (3.25.)$$

Рассмотрим СТЭЛСС с n каналами обслуживания.

Размеченный граф состояний для n -канальной системы с интенсивностью потока заявок λ , производительностью μ и числом мест в очереди m представлен на рис.3.6.

Состояние системы, как и в предыдущем случае, нумеруем по числу заявок и занятым каналам:

- S_0 – все каналы свободны;
- S_1 – один канал занят;
- S_2 – два канала заняты;
- S_n – заняты n каналов;
- S_{n+1} – заняты n каналов, одна заявка в очереди;
- S_{n+m} – заняты n каналов, m заявок в очереди;
- S_{n+m+1} – заняты n каналов, $m+1$ заявка получила отказ.

Пользуясь схемой гибели и размножения, запишем выражения для расчета предельных вероятностей состояний

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \rho / 1! P_0; \\ P_2 &= \rho^2 / 2! P_0; \\ P_n &= \rho^n / n! P_0; \\ P_{n+1} &= \rho^{n+1} / n! n P_0; \end{aligned} \right\} \quad (3.26.)$$

$$P_0 = \left[1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho/n - (\rho/n)^{m+1}}{1 - \rho/n} \right]^{-1} \quad (3.27.)$$

где,
 $\rho = \lambda/\mu$.

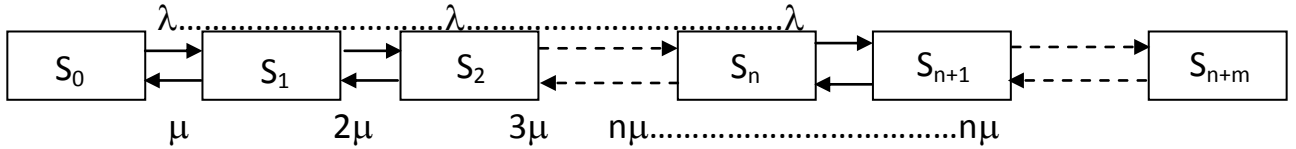


Рис.3.6. Размеченный граф состояний для многоканальной СЭЛСС.

Найдем, используя известные результаты, приведенные для СМО в, основные параметры эффективности СТЭЛСС. Вероятность отказа заявки определится значением P_{m+n} , соответствующим вероятности, что все n каналов и m мест в очереди заняты:

$$P_{отк.} = P_{m+n} = (\rho^{n+m}/n!n^m) P_0. \quad (3.28.)$$

Абсолютная пропускная способность СЭЛСС (Q)

$$Q = \lambda(1 - P_{отк.}) = \lambda[1 - (\rho^{n+m}/n!n^m) P_0] \quad (3.29.)$$

Среднее число занятых каналов равно отношению абсолютной пропускной способности СЭЛСС к производительности одного канала ($Z_{ср.}$):

$$Z_{ср.} = Q/\mu = \rho[1 - (\rho^{n+m}/n!n^m) P_0] \quad (3.30.)$$

Среднее число заявок в очереди можно вычислить как математическое ожидание дискретной, случайной величины, умножая любое возможное число заявок на вероятность того, что именно это число заявок будет в очереди, и складывая полученные суммы:

$$R_{ср.} = 1P_{n+1} + 2P_{n+2} + \dots + mP_{n+m} = (\rho^{n+1}/n!n)P_0[1 + 2\rho/n + 3(\rho/n)^2 + \dots + m(\rho/n)^{m-1}] \quad (3.31.)$$

или

$$R_{ср.} = (\rho^{n+1}/n!n)P_0[1 - (m+1)q^m + mq^{m+1}]/(1-q)^2, \quad (3.32.)$$

где $q = \rho/n$.

Среднее число заявок, находящихся в системе, $k_{ср.} = Z_{ср.} + R_{ср.}$

Значение среднего времени ожидания определяется умножением среднего времени нахождения заявок в i – том состоянии, где $i \geq n$ – число каналов, равное $1/n\mu$, на соответствующую вероятность:

$$T_{ср.,ожид.} = (1/n\mu) P_n + (2/n\mu) P_{n+1} + \dots + (m/n\mu) P_{n+m-1} = (\rho^n/n!n\mu) P_0[1 + 2\rho/n + 3\rho^2/n^2 + \dots + m\rho^{m-1}/n^{m-1}]. \quad (3.33.)$$

Значение $T_{ср.,ожид.}$ можно выразить через параметр $q = \rho/n$:

$$T_{ср.,ожид.} = (\rho^n/n!n\mu) P_0[1 - (m+1)q^m + mq^{m+1}]/(1-q)^2. \quad (3.34.)$$

Среднее время пребывания заявки в системе определится уравнением

$$T_{ср.сист.} = T_{ср.,ожид.} + T_{ср.,в.} \quad (3.35.)$$

Таким образом, математическая модель, рассмотренная в 3.2. позволяет теоретически оценить эксплуатационные параметры линейного тракта кабельной магистрали, например, до и после реконструкции выполненной тем или иным способом с точки зрения вероятности безотказной работы и

производительности магистрали, используя оценочные значения интенсивности потока отказов оборудования и аппаратуры линейного тракта. При этом можно рассматривать вопрос стоимости проведения реконструкции, обеспечивающей требуемые значения вероятности безотказной работы.

Рассмотренная в настоящем разделе математическая модель СТЭЛСС позволит установить соотношения и рассчитать средние значения параметров эффективности одноканальных и многоканальных СТЭЛСС в течение длительного времени (год и более), когда вероятности состояний СТЭЛСС принимают свои предельные значения. Эти параметры целесообразно назвать статическими.

Во многих случаях важно знать параметры СТЭЛСС в течении относительно небольшого отрезка времени, характеризующего работу СТЭЛСС в особых условиях. Эти условия возникают на многих магистралях или на их отдельных участках во время сезона максимальной грозовой деятельности, усиление интенсивности оползней почвы и селей в горной местности, весенних паводков, проведении интенсивных земляных или иных строительных работ в районе прохождения магистрали.

Параметры, определяемые в относительно небольшие периоды работы магистрали, характеризующиеся экстремальным состоянием СТЭЛСС, целесообразно назвать динамическими. Для их определения воспользуемся приведенной моделью и полученными соотношениями с тем отличием, что в качестве исходных параметров (λ и μ) необходимо использовать параметры, полученные в экстремальных условиях работы СТЭЛСС.

В качестве примера рассмотрим эффективность одноканальной и многоканальной СТЭЛСС.

Пусть имеется условная магистраль протяженностью 1500 км, которая состоит из 15 участков ОРП-ОРП. Каждый из участков, протяженностью 100 км, обслуживается одной группой ремонтных рабочих, устраняющих повреждения как кабеля, так и линейных сооружений, и работающих независимо друг от друга, т.е. участок ОРП-ОРП представляет собой одноканальную СТЭЛСС.

Поток повреждений имеет среднее значение интенсивности отказов с перерывом связи на участке ОРП-ОРП:

- $\lambda=9,7*10^{-6}$ 1/час;
- время восстановления $T_{\text{ср.,в.}}=6,5$ час. (для ВОЛС можно положить 16 час.)

Определить:

- пропускную способность СТЭЛСС;
- среднее число заявок, находящихся в очереди на обслуживание;
- среднее число заявок находящихся в СЭЛСС (включая ремонт);
- среднее время ожидания заявки в очереди; среднее время пребывания заявки в СЭЛСС.

В данном примере определяются статические параметры СТЭЛСС, так как $\lambda \ll \mu$ или $T_{\text{ср.о}} > T_{\text{ср.,в.}}$.

По ф. (3.11.) находим производительность СЭЛСС - $\mu=1/T_{в,ср.}=0,154$ 1/час;
 По ф. (3.13.) вычисляем параметр ρ - $\rho=\lambda/\mu=6,3*10^{-5}$;
 По формулам (3.14.), так как $\rho \ll 1$, рассчитываем вероятности состояний с погрешностью $\varepsilon < P_0*10^{-6}$ - $P_0=0,99937$; $P_1=6,296*10^{-5}$; $P_2=39,67*10^{-10}$;
 Пропускную способность СТЭЛСС определяем по ф. (3.29.), полагая $n=1$, $m=1$ - $Q=\lambda(1-P_{отк.})=9,7*10^{-6}$;
 Среднее число заявок, находящихся в очереди подсчитываем по ф. (3.19.) - $R_{ср.,отк.}=\rho^2/(1-\rho)=3,97*10^{-6}$;
 Среднее число заявок, находящееся в СТЭЛСС, по (3.20.) - $K_{ср.,отк.}=R_{ср.}+\rho=6,3*10^{-5} \approx 0$;
 Среднее время ожидания заявки в очереди вычисляем по (3.23.) - $T_{ср.,ожид.отк.}=\rho/\mu(1-\rho)=4*10^{-4}$ час.;
 Среднее время нахождения заявки в СТЭЛСС определяем по ф. (3.24.) - $t_{сис.т.}=1/\mu(1-\rho) \approx 6,5$ час.

Из данного примера видно, что для оценки эффективности работы СТЭЛСС при устранении отказов трактов КМ, допустим, после проведения мероприятий по реконструкции магистрали, сопровождающихся перерывом действия связи, очередь в системе практически отсутствует, число заявок в СТЭЛСС стремится к нулю, а среднее время нахождения заявки в СТЭЛСС совпадает с временем восстановления тракта.

Для реконструированных магистралей, например, когда вместо линейных трактов системы передачи К-60п организованы тракты цифровой системы, например, РСМ-480, LS-34, LA-140*2, и появляется значительное число необслуживаемых регенерационных пунктов, эффективность СТЭЛСС одноканального уровня не может, как правило, обеспечить удовлетворительные характеристики по пропускной способности, времени ожидания заявки в очереди и др.

В следующем примере рассмотрим трехканальную СТЭЛСС. Это означает, что на участке ОРП-ОРП, такой же протяженностью в 100 км, обслуживание производится не одной, как в предыдущем примере, а тремя ремонтными бригадами, действующими самостоятельно и с одинаковой производительностью. Допустимая длина очереди $m=3$. Предположим, также, что система СТЭЛСС работает в динамическом режиме, обусловленным внешними факторами, которые приводят к росту числа отказов (сезонные перемещения грунта, активизация грозодеятельности и пр.).

- Находим производительность СТЭЛСС, интенсивность потока отказов в динамическом режиме при среднем числе повреждений в этот период – 35, среднее время восстановления связи по постоянным схемам примем равным 54 часа, а также вычисляем параметр ρ_d : $\mu_d=1/T_{в,ср.}=1,85*10^{-2}$ час; $\lambda_d=2,35*10^{-2}$ 1/час; $\rho_d=\lambda_d/\mu_d=1,27$. Параметр $\rho_d > 1$, следовательно процесс не является сходящимся, т.е. в течение данного отрезка времени число заявок в очереди СТЭЛСС возрастает.
- Вычисляем параметр $q=\rho/n - q=0,423$.

- Находим предельные вероятности по ф. (3.27.) – $P_{0д} \approx 0,3$.
- Вероятность отказа вычисляем по ф. (3.28.) – $P_{отк} = 1,8 * 10^{-2}$.
- Абсолютная пропускная способность СЭЛСС получится равной - $Q = \lambda(1 - P_{отк.}) = 2,35 * 10^{-2}$ 1/час.
- Среднее число заявок в очереди рассчитываем по (4.32.) $R_{ср} = (\rho^{n+1}/n!n)P_0[1 - (m+1)q^m + m q^{m+1}]/(1 - q)^2 \approx 8,3 * 10^{-2}$.
- Среднее число заявок, находящихся в СЭЛСС, - $k_{ср.} = Z_{ср.} + R_{ср} = 1,351$
- Среднее время ожидания вычисляем по ф. (3.34.) $T_{ср.,ожид.} = (\rho^n/n!n\mu) P_0[1 - (m+1)q^m + m q^{m+1}]/(1 - q)^2 = 3,46$ час.
- Среднее время пребывания заявки в системе $t_{сист.д.} = T_{ср.,ожид.} + T_{ср.в.} \approx 58$ час.

Сравнение полученных результатов показывает, что эффективность работы СТЭЛСС с увеличением числа каналов обслуживания в системе (ремонтных и эксплуатационных) существенно возрастает. Однако увеличение числа каналов связано напрямую с увеличением эксплуатационных расходов. Поэтому на практике число каналов обслуживания, определяемое, в конечном счете, численностью эксплуатационного персонала, должно согласовываться со степенью повышения эффективности работы СТЭЛСС.

Рассмотренные математические модели позволяют с достаточно большой степенью вероятности оценить варианты проведения реконструкции действующих магистралей проводимой как с целью расширения пропускной способности последних, так и с целью повышения эксплуатационной надежности и эффективности системы технической эксплуатации.

В настоящее время может рассматриваться три основных варианта проведения реконструкции;

- организация более мощных цифровых систем передачи по существующим металлическим кабельным линиям связи;
- построение составных линейных трактов путем введения волоконно-оптических линий;
- строительство новых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), как правило, параллельно существующим трассам металлического кабеля.

Одним из основных критериев выбора того или иного способа проведения реконструкции является с одной стороны возрастание трафика на данном направлении, а с другой – какими средствами это достигается. Как следует из рассмотренной выше математической модели эффективность мероприятий по реконструкции возрастает по всем показателям когда в результате реализации проекта достигается уменьшение интенсивности потока отказов - λ и увеличение параметра - $\mu = 1/T_{в.ср.}$. Изменение данных параметров в указанную сторону приводит к возрастанию вероятности безотказной работы и коэффициента готовности, снижению среднего времени ожидания, среднего времени восстановления связи, уменьшению вероятности появления отказов.

Рассматривая возможные варианты проведения реконструкции можно выделить три основных момента:

- при организации трактов ЦСП по существующим металлическим кабелям длина участков регенерации существенно сокращается по сравнению с длиной усилительного участка, появляется много дополнительного активного оборудования (линейные регенераторы) и, соответственно, растут эксплуатационные расходы;
- построение составных линейных трактов, позволяет на отдельных участках магистрали сократить количество активного оборудования, что, естественно, приводит к повышению эффективности СТЭЛСС;
- строительство новых ВОЛС позволяет полностью отказаться от промежуточных необслуживаемых пунктов, что при высокой надежности самого оптического кабеля позволяет сократить затраты на эксплуатацию линейного тракта.

Однако в этом случае, затраты на оптический кабель и строительство могут быть существенно выше, чем в первом случае.

3.4. Эксплуатационные бригады – их формирование, квалификация и оснащение.

В соответствии с основными теоретическими положениями, позволяющими оценить эффективность построения системы эксплуатации, разработаны основные положения по формированию ремонтных кабельных бригад и бригад по обслуживанию и проведению профилактических работ на ВОЛС. Разработаны основные требования к ним.

Технический персонал бригады по обслуживанию ВОЛС обязан знать:

- правила технической эксплуатации, руководства, инструкции, рекомендации, директивные указания по вопросам технической эксплуатации линейного и станционного оборудования ВОЛС;
- теоретические основы волоконно-оптической техники и аппаратуры системы передачи PDH, SDH, в том числе основные параметры волоконно-оптических кабелей, оптических волокон, муфт, кроссового оборудования, мультиплексоров, источников питания, алгоритмы работы системы управления сетью, систем мониторинга (если она установлена);
- методы измерения параметров ВОК и аппаратуры PDH, SDH;
- схемы организации связи на участках сети, электропитания и прохождения линейных трактов по узлам;
- трассы прохождения ВОЛС на участках с привязкой к местности;
- схемы подъезда (подхода) к трассе ВОЛС;
- систему крепления ВОК на опорах, конструкции муфт, оптических и электрических кроссов, мультиплексоров, источников питания и правила их монтажа;
- технологию выполнения работ при снятии и подвеске ВОК на опорах контактной сети, иметь соответствующие документы допуска на работы на контактных сетях или высоковольтных ЛЭП;

- персональный компьютер и порядок инсталляции сетевых мультиплексоров с его помощью;
- общие правила технической эксплуатации, существующие в той отрасли или ведомстве (например, РОСТЕЛЕКОМ, ЭЖД или ГазПром), которой принадлежит конкретная ВОЛС, систему организации аварийно-восстановительных работ, порядок оповещения, сбора и следования бригады к месту работ;
- требования правил техники безопасности, как в части обслуживания ВОЛС, так и при работах в зоне расположения основной транспортной системы;
- эксплуатационную документацию, связанную с обслуживанием ВОЛС и аппаратуры PDH или SDH.

Обслуживающий ВОЛС персонал должен иметь:

- практические навыки в работах по разделке и сращиванию волоконно-оптического кабеля, как механическими соединителями, так и способами сварки;
- опыт работы с необходимой контрольно-измерительной и сварочной техникой;
- опыт настройки и регулировки мультиплексоров PDH, SDH, оборудования электроснабжения;
- права на управление автомобилем (желательно категории «С»);
- персональное удостоверение об окончании соответствующих курсов от организаций, имеющих лицензию на обучение;
- право допуска к самостоятельной работе в условиях, соответствующих особенностям эксплуатации основных объектов отрасли (ведомстве);
- ежегодное переосвидетельствование знаний правил электробезопасности, ПТЭ и ПУЭ.

Принципы формирования эксплуатационных участков (бригад) по обслуживанию ВОЛС и их состав.

На этапе проектирования и строительства как магистральных участков цифровой сети связи Федерального значения, так и внутризоновых или региональных ВОЛС предполагается создать два типа эксплуатационных участков (бригад):

- базовая эксплуатационная бригада, обеспечивающая взаимодействие со структурами служб оперативного управления (СОУ) сети связи магистрального уровня, должна создаваться при каждом региональном операторе;
- линейные эксплуатационные бригады регионального (зонового) оператора.

Базовая бригада от линейной отличается составом оборудования и транспортных средств.

Основными задачами данных подразделений, осуществляющих техническую эксплуатацию линейно-кабельных сооружений и

промежуточных мультиплексоров ввода-вывода или регенераторов в пределах установленного участка, являются:

- обеспечение надежной и высококачественной работы обслуживаемых сооружений и оборудования;
- содержание линейных сооружений и оборудования в соответствии с техническими нормами и требованиями;
- своевременное и высококачественное проведение работ по ремонту и повышению надежности линейных сооружений;
- проведение работ по обеспечению сохранности линейно-кабельных сооружений (ЛКС);
- обеспечение выполнения действующих положений, правил, руководств, инструкций, приказов и директивных указаний по вопросам технической эксплуатации линейных сооружений и сетевого оборудования;
- проведение работ по сбору статистических данных о состоянии ЛКС;
- ведение производственной деятельности и статистической отчетности в соответствии с утвержденными отраслевыми или ведомственными нормами и инструкциями.

В дополнение к этому, на период строительства, бригады непосредственно участвуют в строительно-монтажных и пуско-наладочных работах и выполняют функции технического надзора за ходом строительства.

Базовые бригады оснащаются более сложной измерительной техникой, комплектуются высококвалифицированными специалистами и, в перспективе, по завершении строительства, трансформируются в производственные лаборатории региональных операторов.

В дальнейшем, к вышеуказанным функциям, как в период строительства, так и при последующей эксплуатации, на них возлагаются задачи подготовки кадров и формирования линейных бригад, их оснащение транспортом, механизмами, оборудованием, материалами и измерительной техникой, а также:

- проведение плановых измерений параметров волоконно-оптических линий связи, составление паспортов линейного и сетевого оборудования;
- осуществление метрологического надзора за правильной эксплуатацией измерительных приборов, организация и проведение их поверки в установленные сроки и обеспечение замены в случае несоответствия их параметров современным требованиям, возникающим в процессе развития сети и перехода к более современному оборудованию;
- участие в приемке в эксплуатацию пусковых комплектов при строительстве ВОЛС;
- проведение анализа производственных процессов и внесение предложений по улучшению организации технической эксплуатации, участие в разработке нормативных документов, рекомендаций, инструкций, руководств и технологических карт;

- изучение научно-технической информации по вопросам технической эксплуатации, обеспечение внедрения новой техники, предложений и рекомендаций, направленных на совершенствование эксплуатационной работы.

В качестве примера можно привести структуру формирования эксплуатационных бригад в системе ЭЖД, в частности ЗАО «ТрансТелеКом».

На этапе формирования системы эксплуатации ВОЛС базовые эксплуатационные бригады формируются на железных дорогах и переводятся в прямое подчинение Управлению эксплуатации ЗАО "Компания ТрансТелеКом", с последующим переводом в штат его филиалов на дорогах.

Штат эксплуатационных участков (бригад).

В зависимости от масштабов зон обслуживания и от технической оснащенности участка обслуживания средствами связи состав бригад по обслуживанию ВОЛС может меняться. Оптимальной можно считать бригаду из 5 человек, при ее оснащении легковым автомобилем с прицепом или УАЗ-452 в следующем составе:

- начальник участка эксплуатации ВОЛС - 1 чел.;
- инженер-измеритель ВОК - 1 чел.;
- электромеханик линейно-кабельного оборудования - 1 чел.;
- инженер-измеритель PDH, SDH - 1 чел.;
- электромеханик сетевого оборудования - 1 чел.

Каждый из членов бригады должен уметь выполнять элементарные операции по измерениям ВОК и оборудования PDH, SDH, а также по сращиванию и монтажу ВОК. Обязательным условием является наличие прав на управление автомобилем не менее чем у трех человек.

При оснащении бригады грузовым автомобилем или автомотрисой в состав бригады включается водитель и его дублер.

Штат базовых бригад определяется в зависимости от конкретных объемов строительства ВОЛС и не может составлять менее 5 человек (по аналогии с линейной бригадой).

Помещение для хранения материалов должно быть оборудовано охранно-пожарной сигнализацией, также как и гаражи для стоянки транспортных средств.

Ответственность за сохранность и комплектность оборудования возлагается на начальника участка эксплуатации ВОЛС.

В заключении необходимо сказать, что система эксплуатации и технического обслуживания должна создаваться на единых принципах и, развиваясь далее, сохранять организационно-техническое единство, отвечать международным нормам, обеспечивать высокие параметры качества и надежности связи и быть адаптированной к любым структурным изменениям управления, а также требованиям потребителей услуг цифровой телекоммуникационной сети, выполнять задачи, возникающие в связи с

развитием и построением мультисервисных сетей. Прежде всего, это новое активное оборудование, обеспечивающее весь комплекс современных услуг связи – интернет, цифровое ТВ вещание, мультимедийные опции и пр., которое требует от кабельной техники все большей и большей полосы частот.

Основной целью системы технического обслуживания должна быть минимизация как случаев возникновения, так и влияния отказов, с тем, чтобы, в случае отказа, подготовленный персонал мог быть направлен на выявленное место аварии с необходимым оборудованием, имея достоверную информацию для проведения конкретной работы в установленные сроки.

Конечной целью эксплуатации и технического обслуживания должна быть минимизация общих затрат на содержание сети в течении всего срока ее эксплуатации, складывающихся из капитальных затрат, затрат на использование по назначению, затрат на техническую эксплуатацию и потерь доходов за счет перерывов трафика.

Литература.

1. Никитин, Борис Константинович. Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации направляющих систем электросвязи: учебное пособие / Б. К. Никитин, Л. Н. Кочановский; рец.: Е. Б. Стогов, Т. И. Васильева; Федеральное агентство связи, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2010. - 192 с.
2. Никитин, Борис Константинович. Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации направляющих систем электросвязи [Электронный ресурс]: учебное пособие / Б. К. Никитин, Л. Н. Кочановский ; рец.: Е. Б. Стогов, Т. И. Васильева ; Федеральное агентство связи, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2010. - 192 с.
3. Глаголев, С. Ф. Передаточные характеристики оптических волокон: учебное пособие (спец. 210401, 210404, 210406) / С. Ф. Глаголев, В. С. Иванов, Л. Н. Кочановский; рец. Б. К. Чернов; Федеральное агентство связи, СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2005. - 80 с.
4. Никитин, Борис Константинович. Современные технологии строительства и эксплуатации ВОЛС : учебное пособие / Б. К. Никитин, Г. М. Смирнов, С. Ф. Глаголев ; рец.: Т. И. Васильева, Б. Г. Осипов ; Федеральное агентство связи, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет

телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ,
2012. - 106 с. – (37 экз.).

Раздел РПД 4. Воздействие окружающей среды на ВОЛС различного уровня. Отказы линейных трактов кабельных магистралей. Статистика повреждений и анализ основных причин, вызывающих отказы. Показатели надежности линейных трактов. Понятие коэффициента готовности и времени восстановления.

Мероприятия по оптимизации и повышению эффективности работы системы технической эксплуатации линейных сооружений связи можно разделить на две большие группы:

- организационные мероприятия, заключающиеся в улучшении системы и структуры эксплуатационной службы кабельных магистралей (КМ), повышении квалификации обслуживающего персонала, что особенно важно в структуре эксплуатации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), и т.п.;
- мероприятия технического характера, состоящие в разработке и внедрении новых методов и устройств, обеспечивающих улучшение эксплуатационных и технических характеристик подсистем магистральной связи.

Выбор критериев оптимизации СТЭЛСС и разработка технических мероприятий должны базироваться на основе статистических исследований повреждений КМ, результаты которых, безусловно, будут различны для различных регионов.

Анализ причин повреждения КМ и основные параметры СТЭЛСС.

Основной задачей СТЭЛСС является обеспечение бесперебойной работы трактов и каналов при заданном качестве передачи информации и минимальных эксплуатационных расходах. Данная задача решается в условиях воздействия на ЛСС различных дестабилизирующих факторов, приводящих к возникновению отказов, ухудшающих качество передачи информации.

Отказы и неисправности на ЛСС могут возникать в любой момент времени, образуя случайный процесс – поток отказов.

Одним из основных параметров оценки качества работы КМ является плотность повреждений [10, 13, 19] (плотность отказов), приходящихся на 100 км трассы в год

$$n = \frac{100N}{KL},$$

где N – число отказов на магистрали связи длиной L за K лет.

Значение n может определяться отдельно для:

- всех видов отказов, возникающих в системе ЛСС;
- отказов, приводящих к перерыву связи;
- отказов, вызывающих неисправности;
- отказов только линии связи;
- отказов только стационарных устройств;

- отказов различных подсистем ЛСС, и т.д.

Данное разделение при определении плотности отказов обусловлено необходимостью определять параметры надежности тех или иных подсистем служб эксплуатации.

Кроме плотности повреждений важной характеристикой эффективности и качества работы КМ является интенсивность отказов, определяемая средней плотностью отказов на 1 км трассы КМ в час:

$$\Lambda_{CP} = \frac{n}{100 * 8760},$$

где 8760 – число часов в году, 100 протяженность трассы (км), при которой определяется значение. Значения интенсивности потока отказов на отдельных участках магистрали могут существенно различаться в зависимости от условий эксплуатации на этих участках. Кроме того, существует зависимость Λ_{CP} от времени года.

Для однотипной КМ протяженностью L при постоянных условиях эксплуатации интенсивность потока отказов

$$\lambda = \Lambda_{CP} * L.$$

Для КМ, состоящей из участков с различными средними значениями интенсивности отказов $\Lambda_{CP1}, \Lambda_{CP2} \dots \Lambda_{CPi}$, интенсивность потока отказов

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \Lambda_{CPi} * L_i$$

Вероятность безотказной работы за время t определяется, как показывают экспериментальные исследования [52], показательной функцией

$$P = e^{-\lambda t},$$

Отсюда получим, что плотность распределения случайной величины – времени T безотказной работы – подчиняется закону Пуассона:

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda t}.$$

Отказы на КМ могут возникать как в результате внешних воздействий, так и от внутренних причин. Проведем анализ статистических данных по распределению причин повреждений в процентах от их общего числа.

По данным статистики, простой связей из-за повреждения кабелей, выраженный в канало-часах, составляет значительный процент по сравнению с простым из-за станционных повреждений.

Причины повреждений весьма разнообразны. Общее представление о повреждениях на первичной сети можно получить из анализа статистики материалов по отказам за достаточно большой период (данные МС СССР и далее ОАО «РОСТЕЛЕКОМ»).

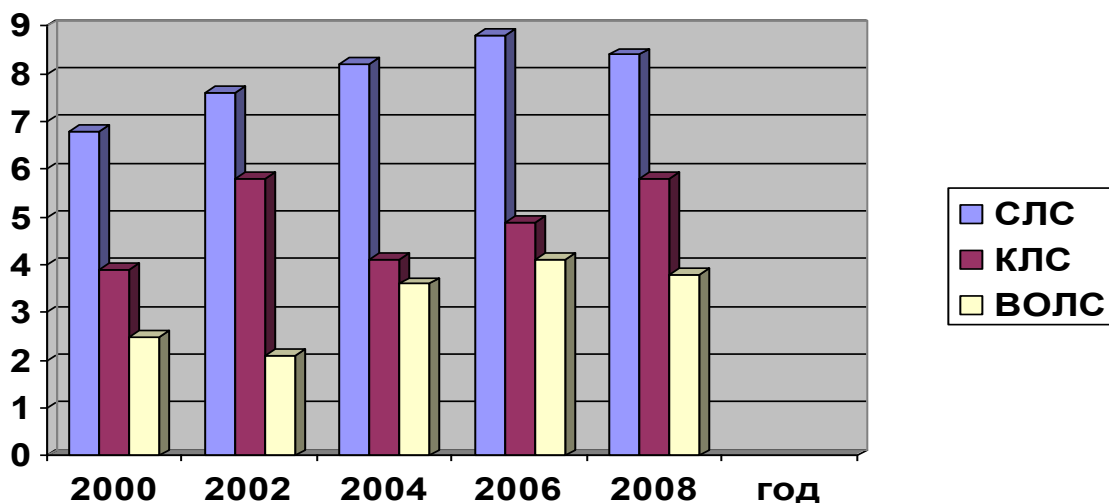
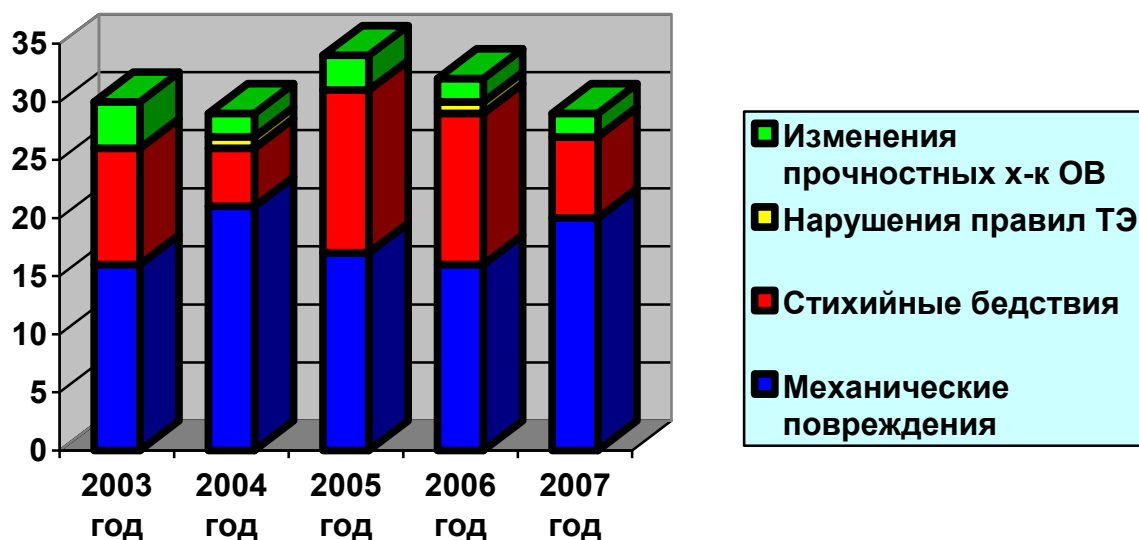
Прежде всего, причины повреждений, которые чаще всего фигурируют в отчетах:

- дефекты строительства и монтажа;
- механические воздействия;
- неправильная эксплуатация;

- коррозия как металлических оболочек кабеля, так о пластмассовых оболочек воздушных ВОК, особенно под воздействием солнечной радиации;
- пробой высоким напряжением, в т.ч. от токов молнии;
- сдвиг и давление почвы;
- повреждения от грызунов;
- старение;
- прочие.

На диаграммах представлена статистика повреждений, от перечисленных выше причин, по магистралям Северо Западного региона.

Эта статистика характерна для Европейской части России, поэтому она



должна быть принята во внимание при разработке различных проектов по СТЭЛСС.

При этом, протяженность ЛС, организованных по симметричным кабелям (СЛС) СЛС=1800км; по коаксиальным (КЛС) КЛС=1400км и протяженность ВОЛС L ВОЛС=1800км. Это, можно сказать, суммарная протяженность участков сети с учетом магистральных, внутризонавых и сельских линий.

Ясно, что количество повреждений техногенного характера (работа сторонних организаций, воровство кабелей и т.п.), которые составляли не более 30% всех повреждений механического характера, в настоящее время приближаются к 50%, причем тенденция к их росту сохраняется на протяжении последних лет.

Процесс устранения отказов на КМ характеризуется средним временем восстановления $T_{CP.B}$, которое складывается из среднего времени обнаружения неисправности $T_{CP.O}$ среднего времени определения характера и места повреждения $T_{CP.ИЗМ}$ и среднего времени ремонта $T_{CP.РЕМ.}$. В случае повреждения кабельной линии или НРП (НУП) к этим составляющим добавляется еще время, необходимое для прибытия аварийной бригады $T_{CP.ТР.}$ на место повреждения линии. Таким образом,

$$T_{cp.v.} = T_{cp.o} + T_{cp.izm.} + T_{cp.рем.} + T_{cp.тр.}$$

Уравнение (5.7.) позволяет определить основные пути уменьшения времени восстановления повреждений кабелей связи в структуре СТЭЛСС.

Для КМ время восстановления много меньше времени безотказной работы T_0 , из этого следует, что $\lambda \approx 1/T_0$ и что восстановление исправного состояния КМ происходит в течении случайного времени $T_{CP.B}$, распределенному по показательному закону с параметром $\mu = 1/T_{cp.v.}$ и плотностью, $\Psi(t) = \mu * e^{-\mu t}$.

Параметр μ называют производительностью подсистемы восстановления работы кабельных магистралей, так как он равен числу устраняемых отказов в единицу времени.

Причины повреждения ВОЛС идентичны повреждениям на металлических линиях. Особенно это касается повреждений механического характера.

Установлены также и отличия, связанные с принципами распространения сигнала по волокну, определяемые параметрами оптических волокон.

Одним из основных параметров надежности КМ, является коэффициент готовности K_g , который определяется как отношение суммарного времени исправной работы КМ к общему времени наблюдений. Этот параметр учитывает все составляющие системы эксплуатации и может быть рассчитан для каждой подсистемы отдельно.

$$K_z = \frac{\left(T_0 - \sum_{i=1}^n T_n * n_i \right)}{T_0} = \frac{\left(T_0 - T_B * n \right)}{T_0}$$

Оценочный расчет показателей надежности, выполняемый на стадии проектирования, для магистралей первичной сети при различной протяженности тракта, должен соответствовать значениям, приведенным в таблицах, которые являются целевыми.

Для местной первичной сети, $L_{\text{мпс}} \approx 200$ км.

Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,997	>0,9994	>0,9987
Среднее время между отказами, час	>400	>7000	>2500
Время восстановления	<1,1	<4,24	См. примечание

Для внутризонавой первичной сети, $L_{\text{впс}} = 1400$ км.

Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,99	>0,998	>0,99
Среднее время между отказами, час	>111,4	>2050	>350
Время восстановления	<1,1	<4,24	См. примечание

Для магистральной первичной сети, $L_{\text{мпс}} = 12500$ км.

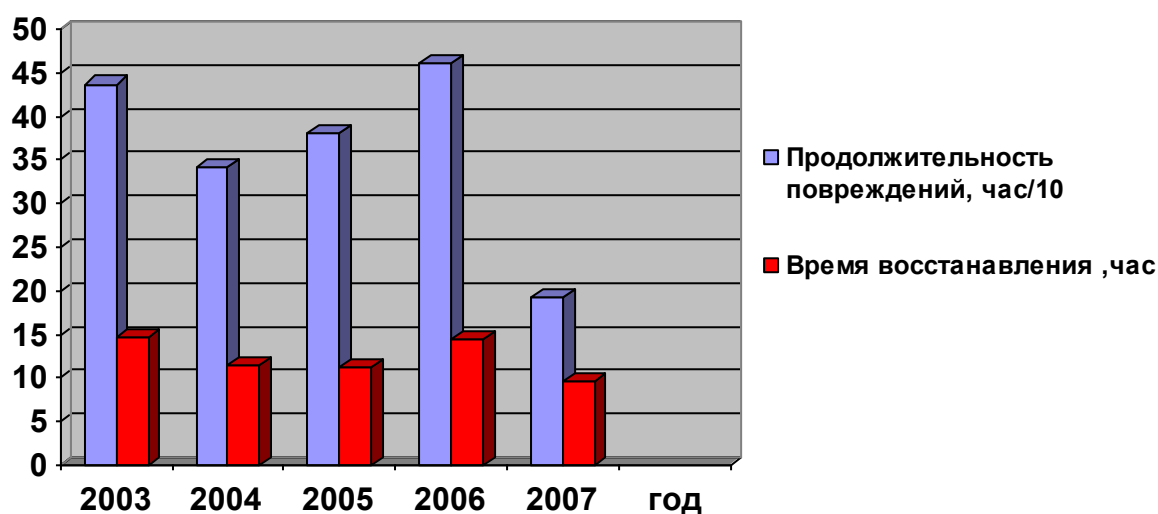
Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
Коэффициент готовности	>0,92	>0,982	>0,92
Среднее время между отказами, час	>12,54	>230	>40
Время восстановления	<1,1	<4,24	См. примечание

Примечание. Для оборудования линейных трактов время восстановления должно лежать в пределах следующих значений:

- время восстановления необслуживаемого регенерационного пункта (НРП) – $T_v(\text{НРП}) < 2,5$ час. (в том числе время подъезда – 2 часа);
- время восстановления обслуживаемого регенерационного пункта и оконечного пункта (ОРП, ОП) – $T_v(\text{ОРП}) < 0,5$ часа;

- время восстановления симметричного кабеля в зависимости от типа и емкости – $T_{в}(СК)$ в пределах 6 – 8 часов (в том числе время подъезда – 2 часа);
- время восстановления коаксиального кабеля в зависимости от типа и емкости – $T_{в}(КК)$ в пределах 4,6 – 8,8 часов (в том числе время подъезда – 2 часа);
- время восстановления оптического кабеля в зависимости от типа и емкости – $T_{в}(ОК)$ в пределах 10 – 16 часов (в том числе время подъезда – 3,5 часа).

Реальные значения продолжительности повреждений и времени восстановления для ВОЛС, например, представлены на диаграмме рис.5.3.



Статистика восстановления ВОЛС.

Рассчитывая среднее значение интенсивности отказов за год λ на 100км кабельной линии, в соответствии с выражением (5.3) для реальных значений отказов, приведенных на диаграммах, получим:

$$\lambda_{слс}=0,62, \lambda_{клс}=0,91, \lambda_{волс}=0,5.$$

При этом, полученные значения интенсивности отказов различны ввиду различной протяженности КМ и, как следствие, различного количества простоев рассматриваемых магистралей.

Расчет среднего значения коэффициента готовности (K_g) реальных кабельных магистралей с учетом среднего времени восстановления, значения которого приведены в таблицах, получим: $K_{гслс}=0,994$, $K_{гклс}=0,996$, $K_{гволс}=0,996$.

Полученные значения, для сравнения со значениями коэффициента готовности, рекомендованным в таблицах целевых значений, с учетом соответствующих длин магистралей, могут быть пересчитаны путем вычисления числа повреждений приходящихся на 100 км трассы КМ и умножения на соответствующую длину.

При этом получим:

- на местной первичной сети для оборудования линейного тракта - $K_{гслс}=0,987$, $K_{гклс}=0,989$, $K_{гволс}=0,992$;
- на внутризоновой первичной сети для оборудования линейного тракта - $K_{гслс}=0,982$, $K_{гклс}=0,984$, $K_{гволс}=0,986$;
- на магистральной первичной сети для оборудования линейного тракта - $K_{гслс}=0,86$, $K_{гклс}=0,864$, $K_{гволс}=0,862$.

Сравнивая расчетные средние значения коэффициентов готовности с рекомендованными и полученными на основе анализа статистической модели, можно сделать вывод, что реальные их значения достаточно далеки от рекомендуемых, что и вызывает необходимость поиска путей повышения значений последних.

Основные факторы воздействий на ВОЛС в процессе производства, строительства и эксплуатации.

В качестве иллюстрации перечисленных выше положений, можно привести некоторые примеры воздействий на те, или иные ВОЛС и проблемы, которые возникают в процессе эксплуатации.

Оптическое волокно становится ключевым элементом построения современных линий связи и сетей широкополосного доступа. При этом важным требованием, предъявляемым к ВОЛС, является требование к их долговечности.

Однако для увеличения срока службы оптического волокна необходимо выполнить ряд условий в процессе его **производства, строительства и эксплуатации.**

В процессе производства.

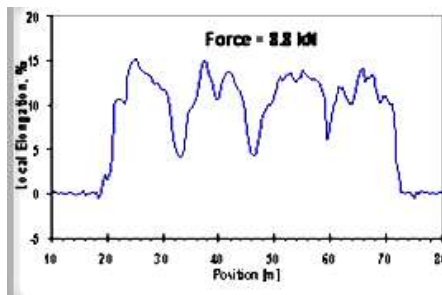
Главное – отсутствие механических напряжений, которые могут возникать в волокне.



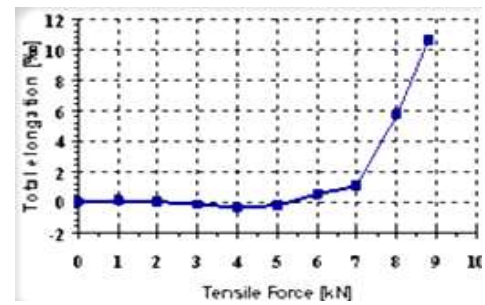
Возможные причины появления механических напряжений внутри оптического волокна - нарушение технологического процесса производства оптоволоконного кабеля.

В результате нарушения технологии изготовления заготовки или в процессе вытяжки волокна, в нем могут возникнуть локальные «вмороженные» неоднородности кварца, которые и являются центрами внутренних напряжений. Подобные

напряжения делают оптическое волокно уязвимым даже к небольшим по амплитуде вибрациям или изгибам.



Измеренные бриллиэновским рефлерефлектометром.



Измеренные методом фазового набега;

Кроме того, могут иметь место нарушения в технологии производства самого кабеля, в результате чего условие свободной укладки волокон в модулях может быть нарушено (рис. 5.5). В этой связи хочется обратить внимание, что использующийся многими кабельными заводами метод фазового набега для контроля механического напряжения оптических волокон в кабеле дает не корректные результаты. Это можно увидеть из результатов теста, который проводила компания Swisscom. На графике - **A)** приведены значения, полученные методом фазового набега, на **B)** – измеренные бриллиэновским рефлектотометром.

Рефлектометр бриллиэновский ANDO AQ8603

Созданный на острие передовых технологий новый бриллиэновский рефлектометр AQ8603 предназначен для обнаружения и анализа механических напряжений волокна в оптическом кабеле, как в процессе его производства, так и в процессе его прокладки и эксплуатации. Значительно возросшая по сравнению с предыдущей моделью точность измерений напряжения в волокне позволяет с высокой достоверностью определить надежность оптического кабеля и вовремя предотвратить ухудшение связи и разрыв волокна.

Области применения.

Оценка качества прокладки и долговечности оптической линии.

Контроль надежности и мониторинг эксплуатируемых оптических линий.

Анализ распределения потерь и внутренних напряжений при производстве оптического кабеля.

Исследования и разработки в области оптических кабелей.

Исследования чувствительности оптического волокна к различным факторам (изменение температуры, натяжение, изгиб).



Технические характеристики.

Дисплей	10,4" цветной ЖК-дисплей 800 x 600 точек				
Отображение результатов измерений	Распределение напряжений по длине линии, спектральное распределение бриллюэновского рассеяния, распределение оптических потерь				
Диапазон установки длины	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80 км				
Число точек в рефлектограмме	Макс. 20000				
Диапазон установки группового показателя преломления	1,00000€1,99999 (с шагом 0,00001)				
Погрешность измерения длины	$\pm(2,0 \cdot 10^{-5}) \cdot L_{OV}$ (м) + 2-х разрешение считывания)				
Диапазон измеряемых внутренних напряжений	От -1,5% до +1,5% (от -15000 до +15000 me)				
Погрешность измерения напряжений	$\pm 0,004\%$ (2s) $\pm 0,003\%$ (2s)				
Применяемое волокно	Одномодовое SM 10/125				
Длина волны	1550 нм				
Диапазон измеряемых частот сдвига	От 9,9 до 11,9 ГГц				
Установка интервала частоты сдвига	1, 2, 5, 10, 20, 50 МГц				
Длительность импульса	10 нс	20 нс	50 нс	100 нс	200 нс
Пространственное разрешение, м	1	2	5	11	22
Динамический диапазон, дБ	2	6	10	13	15
Измеряемая длина, км	7	20	30	50	55
Интерфейсы	Последовательный порт: RS-232C (9-pin разъем) GP-IB порт Видео выход: SVGA (15-pin разъем) Клавиатура, мышь: PS/2				

В процессе строительства.

Это нарушение норм, регулирующих процессы прокладки оптического кабеля. К сожалению, избежать оплошностей и ошибок при прокладке кабеля невозможно.

Все изгибы кабеля с радиусом меньше рекомендованной величины, различного рода заземления или неправильный крепеж кабеля обернутся в итоге повышенным натяжением волокна в кабеле и его преждевременным разрушением.

Безусловно, отдельно нужно рассматривать вопросы надежности при строительстве ВОЛС различными способами - путем прокладки кабеля в грунт, защитную трубу, воздушные способы, в основных вариантах – это подвеска, ВОК в грозозащитном тресе, самонесущий ВОК, навивная технология, т.к. факторы влияющие на стабильность параметров ВОЛС в этих вариантах разные.



Плохая подготовка траншеи, наличие камней и неоднородностей грунта

Прокладка ВОК в плохо подготовленную



Рис.5.8. Перемещение грунта в результате землетрясения.



Рис.5.9. Прокладка и монтаж кабеля в мороз.



Рис.5.10. В таких условиях вечной мерзлоты прокладка кабеля в грунт практически

При прокладке кабеля в грунт это, прежде всего подготовленность траншеи, отсутствие в ней различных неоднородностей – камней, уплотнений грунта, посторонних предметов и пр. Необходимо учитывать возможность смещения слоев грунта в результате его вспучивания (таяние

вечной мерзлоты, селевые потоки, оползни и пр.). Прокладка ВОК в условиях отрицательных температур чревата нарушениями внутренней структуры кабеля. При отрицательных температурах, какой бы хороший не был гидрофобный наполнитель, его вязкость возрастает, что препятствует свободному перемещению волокон в сердечнике кабеля и является причиной

Прокладка и монтаж ОК в мороз и без передвижной лаборатории. В мороз изменяется вязкость гидрофобного наполнителя, что приводит к дополнительным

возникновения дополнительных напряжений (рис.5.9). Даже незначительные подвижки слоев грунта могут оказаться фатальными для целостности волоконного кабеля и привести к обрыву волокон в нем. Особенно сильно этот процесс проявляется в районах с повышенной сейсмоактивностью (рис.5.8.), в местах разломов горных пород и в районах вечной мерзлоты (рис.5.10.). В таких условиях не рекомендуется прокладывать оптический

кабель в грунт, целесообразно применять воздушные способы строительства, вплоть до восстановления опор воздушных линий связи, которые были построены еще в начале прошлого века.

В городских условиях, это, прежде всего, просаживание каналов кабельной канализации в результате различного рода протечек городских коммуникаций.

При прокладке волоконно-оптического кабеля в городской черте широко используются канализационные коммуникации, которые в свою очередь подвержены деформациям в результате, например, просадки грунта (рис.5.11).

Так как кабель внутри них обычно жестко фиксируется, то в результате деформаций канализационных ходов могут возникать локальные деформации оптических волокон.

Возникшие напряжения, в последствии, неминуемо приведут к обрыву оптического волокна.

В данном случае оптическое волокно может выступать в роли сенсора подобных деформаций. Имея соответствующее измерительное оборудование, по характеру возникших напряжений внутри волокна можно судить о масштабе и опасности деформаций.

Слабым местом воздушных способов строительства является некорректное крепление кабеля к телу опоры. В результате воздействия ветровых нагрузок с течением времени на оболочке кабеля появляются трещины, которые вызывают дальнейшее ее разрушение. Отсутствие защитного контейнера в местах соединения строительных длин (рис.5.12) приводит к тому, что в осеннее – зимний период между витками технологического запаса кабеля накапливается влага, которая, естественно, замерзает и увеличивается в объеме. Это вызывает постоянное перемещение витков кабеля относительно друг друга, дополнительные изгибы и напряжения.

Подвеска кабеля в мощном электрическом поле чревата развитием трекинг-процесса (возникновением поверхностных токов - треков, протекающим по микротрещинам в оболочке кабеля), который вызывает достаточно быстрое разрушение (сгорание) всего кабеля.



Рис.5.11. Просаживание грунта и повреждение кабельной канализации



Неудачное крепление самонесущего ВОК. В месте крепления троса к опоре и кабеля к тросу, при ветровых нагрузках повреждение неотвратимо.

Отсутствие защитного контейнера для муфты и технологического запаса ВОК.

Рис.5.12. Крепление самонесущего ВОК к опоре



Рис.5.13. Обледенение ВОК.

5.5. Перепады температуры окружающей среды (сезонные и среднесуточные).

Так как кварц, элементы кабельного сердечника, защитная оболочка волоконного кабеля, средства его крепежа, грунт и материалы коммуникаций имеют различные коэффициенты теплового расширения, то в случае резкого перепада температуры могут возникать существенные напряжения внутри оптического волокна из-за неравномерного расширения соприкасающихся материалов. В результате большие среднесуточные колебания температуры окружающей среды могут привести к разрушению волокна.

Как и в случае с обычным электропроводом, возникает проблема, связанная с обледенением определенных участков кабеля в зимний период (рис.5.13).

Соответственно, натяжение волокна под весом льда будет причиной появления напряжений внутри волокна, которые могут оказаться необратимыми и значительно сократить его срок службы.

5.7. Ураганные нагрузки на опоры и подвесные кабели.

В последнее время все более популярным становятся воздушные методы прокладки оптического кабеля с подвешиванием его, на различного рода опорах - телеграфных и



Рис.5.14. Повреждения опор ЛЭП и ВОЛС, на них подвешенной.

волокна может привести к многократному уменьшению его срока службы.

Вдумайтесь: время жизни волокна в нормальных условиях эксплуатации (при относительном удлинении волокна меньше 0,3 %) составляет 25 лет и более, в то время как уже при относительном удлинении 0,6 – 0,7% разрыв волокна произойдет в течение 1 (одного)!!! года.

Таким образом, надежность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о

высоковольтных столбах линий электропередач, контактных сетях электрофицированных железных дорог и пр.

Однако все опоры рассчитаны на определенные нагрузки и при возникновении нештатных ситуаций они могут быть повреждены (рис.5.14).

5.8. Просаживание фундаментов зданий, мостов, эстакад и прочих инженерных сооружений.

Проблемы, аналогичные описанному выше, возникнут с волокном в случае просаживания фундаментов инженерных строений или при деформации их отдельных частей (рис.5.15, 5.16).. Повышенное натяжение волокна в кабеле вызывает деградацию его прочностных характеристик, что в конечном итоге приводит к разрыву волокна. Даже незначительное увеличение натяжения



Рис.5.15. Обрушение и просаживание фундаментов зданий.



Рис.5.16. Разрушение мостов и эстакад в результате наводнений, оползней.

натяжении волокна в кабеле. Необходимо, однако, отметить, что зачастую все вышеперечисленные явления являются относительно медленными во времени процессами. И с момента появления напряжений в волокне до момента обрыва пройдет не один месяц, а возможно и год.

И с момента появления напряжений в волокне до момента обрыва пройдет не один месяц, а возможно и год. За этот промежуток времени

можно не только обнаружить проблему, но и устранить ее, имея соответствующее измерительное оборудование. Обычные оптические рефлектометры не в состоянии определить натяжение волокна, поскольку величина оптических потерь при возникновении напряжений в световоде, как правило, остается в пределах нормы вплоть до момента наступления необратимых изменений в нем.

Безусловно, основной мерой оценки надежности ВОЛС может служить статистическая информация о причинах, характере и количестве повреждений на линиях, работающих в различных условиях.

Эту информацию в современных трактах, основанных как на металлических кабелях, так и волоконно-оптических, собирают системы мониторинга. Эти системы в той или иной мере отвечают потребностям СТЭЛСС, но они достаточно дороги и если трафик на заданном участке невелик, то используют самые простейшие системы. Определить место повреждения ВОК или отказавший узел в аппаратуре это только половина дела.

Другая задача и, пожалуй, главная в СТЭЛЛС – это устранить этот отказ, как показывают выражения 5.7, 5.8, в самое короткое время. И вот здесь мы вплотную подходим к вопросу оптимизации СТЭЛСС, основные критерии которой:

- объем трафика на данном участке;
- потери доходов при его сокращении в результате отказа;
- время восстановления трафика (не путать с временем восстановления ВОЛС);
- затраты на мероприятия по восстановлению трафика и их сравнение с потерями доходов;
- количество и состав инженерно-технического персонала, обслуживающего данную ВОЛС;

- оснащенность техническими средствами для ремонта и измерения;
- оснащенность запасным оборудованием (кабелем, пассивными компонентами, аппаратурой и ее частями);
- транспортные проблемы.

Оценка этих критериев может быть выполнена на основе положений гл.4 и статистического анализа состояния ВОЛС в данном регионе.

Литература.

1. Семёнов С. Л. Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 1997 г.

2. Ларин Ю.Т., Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. М.: Престиж, 2006 г.

3. Спиридонов, В.Н. Цели и задачи технического надзора при строительстве ВОЛС // *Lightwave*. 2004. № 2.

4. Надежность оптических кабелей связи / Ю.Т. Ларин. – М.: Информэлектро, 1990. – 35 с.

5. Некоторые аспекты эксплуатации и надежности ВОЛС / Б. Никитин, Е. Стогов // *Первая миля*. 2008. № 2.

6. Аварийно-восстановительные работы на ВОЛС / Л.М. Овсянников // *Фотон-экспресс*. 2000. № 20.

7. Б.Д. Носков. Строительство волоконно-оптических линий с прокладкой кабелей в пластмассовых трубопроводах. Автоматика, телемеханика и связь, 1997.

8. Руководящий технический материал по технической эксплуатации волоконно-оптических систем передачи на внутризональных и магистральных первичных сетях ВСС России / ЦНИИС. – М., 1997.