**Введение**

 В последние два десятилетия прошедшего и в начале текущего века происходит смена эпохи индустриально-технологического развития передовых государств эпохой информационно-технологической. Ярким проявлением этого процесса является невиданный по скорости и результатом прогресс в создании новых методов и средств телекоммуникаций. Бурное развитие технологии производства систем и средств связи с практически неограниченной пропускной способностью и дальностью передачи и массовое их использование, по сути, привели к информационно-технологической революции и формированию глобального информационного общества. Сегодня телекоммуникации - это одна из самых быстроразвивающихся высокотехнологических и наукоемких отраслей мировой экономики. Уровень развития технологических разработок, производства и внедрения в различные сферы деятельности телекоммуникационных систем во многом формируют положительный образ передового государства.

Одним из основных направлений современного научно-технического прогресса является всестороннее развитие волоконно-оптических систем связи, обеспечивающих возможность доставки на значительные расстояния чрезвычайно большого объёма информации с наивысшей скоростью. Уже сейчас имеются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) большой информационной емкости с длиной регенерационных участков более 200 км. Однако область применения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) не ограничивается передачей данных на большие расстояния для непосредственной связи, а имеет более широкий спектр, от бортовых систем до локальных (LAN) и глобальных (WAN) волоконно-оптических телекоммуникационных сетей.

Потребности в дальнейшем наращивании пропускной способности систем передачи информации стимулировала исследования в направлении поиска новых методов решения этой задачи. Одной из перспективных технологий систем передачи с использованием ВОЛС является технология WDM. Эта технология становится актуальной, когда оператор заинтересован в увеличении скорости передачи своих сетей. На междугородной сети с появлением новых услуг и технологий (мультисервисных сетей, АТМ технологий, мультимедиасвязи, и.т.д.) Потребность в увеличении пропускной способности сетей связи удваивается каждый год, и этот темп вряд ли замедлится в ближайшие десять лет. Снижение цен поставщиками, ослабление монопольных позиций государства в телекоммуникациях и неослабевающий интерес к использованию Интернета приводят только к увеличению спроса на скорость передачи. На сегодняшний день технология DWDM обеспечивает самый быстрый и экономичный рост полосы пропускания, на практике показывая свою надежность. Во многих случаях благодаря применению технологии DWDM пропускная способность оптической линии связи может быть увеличена в сотни раз.

По-видимому, данная технология еще не скоро достигнет своего предела по пропускной способности. В опытных системах уже достигнута передача нескольких сотен каналов по одному оптическому волокну. Дальнейший рост числа каналов возможен за счет уменьшения спектрального расстояния между ними, использования усилителей EDFA с большей шириной спектра, или за счет применения специализированных волокон, позволяющих осуществлять передачу в диапазоне шириной до 1200 нм без дополнительного усиления.

Впечатляющий рост пропускной способности достигается при увеличении скорости передачи данных в каждом канале. В современных цифровых системах передачи эта скорость составляет 2.5 Гбит/с или 10 Гбит/с. Были продемонстрированы опытные образцы систем со скоростью передачи 40 Гбит/с на канал, причем уже возможна одновременная передача данных по 192 каналам со скоростью 40 Гбит/с в каждом. Это соответствует суммарной скорости передачи более 5 Тбит/с по одному волокну.

Чтобы получить дополнительные цифровые каналы с наименьшими капитальными затратами, и предлагается использовать спектральное уплотнение. При этом получаемые длины волн эквивалентны по пропускной способности оптическим волокнам при технологии SDH. Внедрение систем DWDM определяется несколькими факторами:

- увеличение пропускной способности волоконно-оптического кабеля с помощью мультиплексирования на основе DWDM может оказаться более экономичным, чем строительство новых кабельных линий;

- появляются новые службы – "пожиратели полосы пропускания";

- сигнал, мультиплексированный в системе DWDM, переносится в оптической форме без промежуточных преобразований.

 В качестве магистральной системы передачи наиболее перспективно использование технологии DWDM, поэтому темой дипломной работы является Внедрение DWDM технологии в оптоволоконную сеть.

 Глава 1.Обзор технологии DWDM и обоснование.

# 1.1 DWDM –технология уплотнения оптических каналов.

Технология DWDM (Dense Wave length Division Multiplexing) обеспечивает наибольшую пропускную способность при использовании одной оптической пары. Высокая пропускная способность достигается за счет применения технологии мультиплексирования по длине волны, когда по одной оптической паре передается несколько независимых потоков, каждый на своей длине волны. Существующее сейчас оборудование позволяет использовать до 80 оптических каналов с возможностью расширения до 300 каналов в будущем. В каждом из таких каналов прозрачно передается информационный поток на скоростях от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с.
Внедрение технологии плотного спектрального мультиплексирования по длине волны (Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM) создает возможность повышения эффективности передачи трафика в оптических каналах городских сетей. Наиболее привлекательной особенностью технологии DWDM, как с технической, так и с экономической точки зрения, является ее способность поддерживать практически неограниченные возможности по передаче трафика. Она не только защищает инвестиции, вложенные в существующие оптоволоконные каналы, но и повышает их возможности, по меньшей мере, в 32 раза. По мере роста спроса вы сможете расширять емкость своей сети с помощью простых модернизаций оборудования или за счет увеличения количества задействованных длин волн, не прибегая к дорогостоящим реконструкциям. Расширяя емкость, вы будете платить только за новое оборудование. Что же касается кабельной сети, то она останется прежней.Основными сетевыми элементами сети DWDM являются:

* DWDM-мультиплексоры/демультиплексоры;
* DWDM-мультиплексоры ввода/вывода;
* DWDM-транспондеры, преобразующие оптические сигналы (одномодовые или многомодовые) от оборудования пользователя к одной из DWDM длин волн;
* оптические усилители;
* компенсаторы дисперсии.

Помимо полосы пропускания, технология DWDM имеет целый ряд других преимуществ:

* **Прозрачность**. Поскольку DWDM – это архитектура физического уровня, она может прозрачно поддерживать мультиплексирование с разделением по времени (TDM) и форматы данных ATM, GigabitEthernet, ESCON и FibreChannel с открытыми интерфейсами на общем физическом уровне.
* **Масштабируемость**. DWDM может использоваться для быстрого наращивания емкости в соединениях «точка–точка» и сегментах существующих колец SONET/SDH.
* **Динамическое обеспечение сети (DynamicProvisioning),**быстрое и простое динамическое обеспечение сетевых соединений позволяет провайдерам осуществить стратегическое распределение полосы пропускания (Strategic Bandwidth Allocation), т. е. довести оптические каналы до отдельных зданий.



.

 Рис. 1.1 Компоненты системы DWDM.

 1.2 Обоснование выбора технологии.

Чтобы и дальше обеспечивать клиентов высококачественной и быстрой связью, необходимо увеличивать мощности основных телекоммуникационных маршрутов, и увеличивать значительно.
Есть два варианта увеличения пропускной способности сети:

 – повышение каналов SDH до уровня STM-64 (10 Гбит/с) и увеличение количества таких каналов. Однако каждый следующий канал STM-64 потребует установки оборудования и проведения строительно-монтажных работ на всех узлах магистрали, а уже для третьего канала нужно будет прокладывать новый кабель. Для обеспечения растущих потребностей клиентов Компании уже в самые ближайшие годы потребуется порядка четырех каналов уровня STM-64;

 - строительство сети по технологии DWDM, которая позволит увеличить пропускную способность сети во много раз, поскольку по одному волокну будет передаваться 40 каналов STM-64, а дальнейшее расширение сети потребует только установки дополнительных карт.

Очевидно, что технология DWDM обладает преимуществом, как с точки зрения пропускной способности, так и возможности дальнейшего умощнения сети:

- DWDM является стабильной платформой для предоставления услуг, а возможность значительного расширения емкости делают сеть удобной для пользователя;

- Технология обеспечивает передачу трафика широкого спектра решений, от систем IP до оборудования SDH и других;

- Существуют большие возможности для масштабирования сети, что означает уверенность в завтрашнем дне для клиентов;

- DWDM-технология позволяет сети совмещать гибкость управления относительно низкоскоростными каналами на периферии со скоростной передачей гигабитных потоков в основных магистралях.

По мере прохождения по оптическому волокну сигнал постепенно затухает. Для того чтобы его усилить, используются оптические усилители. Это позволяет передавать данные на расстояния до 4000 км без перевода оптического сигнала в электрический (для сравнения, в SDH это расстояние не превышает 200 км).

Преимущества DWDM очевидны. Эта технология позволяет получить наиболее масштабный и рентабельный способ расширения полосы пропускания волоконно-оптических каналов в сотни раз. Пропускную способность оптических линий на основе систем DWDM можно наращивать, постепенно добавляя по мере развития сети в уже существующее оборудование новые оптические каналы.

##

##  Глава 2. Обзор системы DWDM OptiX BWS 1600G

* 1. **Выбор типа аппаратуры**

 На всей сети ТрансТелеКом используется оборудование китайской фирмы Huawei Technologies. При выборе аппаратуры DWDM будем руководствоваться не только техническими данными аппаратуры, но и данными корректной совместной работы оборудования, без применения аппаратуры согласования.

Разработанная компанией Huawei магистральная оптическая система передачи DWDM OptiX BWS 1600G, является магистральным оптическим оборудованием передачи нового поколения большой ёмкости. Она разработана с учетом современного состояния и развития в будущем оптических сетей.

Модульная конструкция, поддержка разнообразных конфигураций и гибкие возможности резервирования позволяют системе OptiX BWS 1600G играть ведущую роль в оптической сети передачи. Ёмкость доступа оптических волокон может быть плавно увеличена от 10 Гбит/с до 1600 Гбит/с. При расширении системы отсутствует необходимость отключать оборудование или прерывать предоставление услуг. Необходимо всего лишь установить новые аппаратные средства или новый узел. В типичной конфигурации с резервированием даже добавление узла OADM не окажет влияние на работу системы.

Система может быть развернута с использованием топологии "точка-точка", линейной и кольцевой сети. Являясь магистральным уровнем сети, она используется для соединения сетей крупных городов и пропуска большого объёма трафика оптической коммутационной аппаратуры, оборудования DWDM городской сети (MAN, metropolitan area network), оборудования SDH или маршрутизаторов.

Система OptiX BWS 1600G передает однонаправленные сервисные сигналы по одному оптическому кабелю, то есть двунаправленная передача осуществляется двум оптическим волокнам, одно оптоволокно используется для передачи, а другое для приема. Использование мультиплексоров/демультиплексоров AWG-типа, эрбиевых волоконно-оптических усилителей, усилителей Рамана, источников сигналов со стабильными длинами волн, функции балансировки мощности каналов, устранение "чирпирования" (pre-chirp), компенсации дисперсии, универсальной и централизованной системы управления сетью делает OptiX BWS 1600G высоконадежной с точки зрения рабочих характеристик и гибкой с точки зрения организации сети. Система управления сетью передачи, разработанная компанией Huawei (сокращенно NMS - network management system), не только поддерживает управление оборудованием DWDM, но также поддерживает и управление всей серией оборудования OptiX, включая оборудование SDH и METRO. Согласно Рекомендациям ITU-T NMS поддерживает большой набор функций технического обслуживания сети. Она позволяет осуществлять обработку отказов, управление рабочими характеристиками, конфигурацией, резервированием, техническим обслуживанием и тестированием всей сети OptiX. NMS также поддерживает функцию сквозного управления согласно требованиям пользователей. Она повышает качество сетевых услуг, снижает эксплуатационные расходы и гарантирует рациональное использование сетевых ресурсов.

Используемая в системе OptiX BWS 1600G NMS обладает мощными и современными функциональными возможностями и предоставляет дружественные пользователю интерфейсы “человек-машина”. Используемый в её конструкции объектно-ориентированный подход позволяет пользователю активизировать или деактивизировать любую услугу в соответствии с возможностями физической сети. В сети OptiX BWS 1600G NMS поддерживает сквозное управление каналами (длинами волн), статистический анализ ресурсов длин волн, управление аварийной сигнализацией, управление рабочими характеристиками, управление системой, управление и техническое обслуживание оборудования и т.д.

|  |  |
| --- | --- |
| Интерфйсы | Fibre Channel 1 Gbps,Gigabit Ethernet, SDH (STM-16/64), SONET: OC-48c/192c, 10 Gigabit Ethernet |
| Разнос несущих, ГГц | 50/100 |
| Транспондеры | На фиксированную длину волны перестраиваемые |
| Построение OADM | С выделением 2хN оптических каналов или 40 каналов |
| Базовый мультиплексор/демультиплексор | На 40 длин волн |
| Сервисные интерфейсы | RS-232/422, сухие контакты 16 входов, вывод сигнализации 8 портов |
| Предельный OSNR на участке усиления | 17дБ |
| Компенсаторы дисперсии | L,C на 10,40,60,80 км |
| Оптические усилители | Автоматическая регулировка |
| Канал управления | OSC управляющий оптический канал |
| Резервирование | Без;1+1 два транспондера и два клиентских интерфейса (маршрут); Y-кабель 2 транспондера один интерфейс |

Технические характеристики системы представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Технические характеристики системы DWDM производства Huawei Technologies,КНР OptiX BWS 1600G.

|  |  |
| --- | --- |
| Модель | OptiX BWS 1600G |
| Диапазон длин волн | C,L |
| Количество длин волн в базовой системе | 40 |
| Тип используемого волокна | Одномодовое в соответствии с G.652, G.655, G. 653 |
| Расширение количества длин волн | До 192 |
| Наличие служебной связи | Да, аналоговые телефоны |
| Система управления | T2000 |

 Для связи на большие расстояния требуется восстанавливать групповой сигнал через каждые 600 км. И тогда вместо OADM в некоторых точках необходимо установить регенераторы. Данный участок не превышает 600 км, поэтому не требуется регенератор.

Оптическая система передачи DWDM OptiX BWS 1600G включает статив, подстатив, блок питания, блок вентиляторов (включая воздушный фильтр), полку модуля компенсации дисперсии (Dispersion Compensation Module, DCM) и полку концентраторов. В стативе крепятся подстативы с различными комбинациями плат Основной полкой является статив с закрепленной задней панелью и съемными боковыми панелями с обеих сторон. Блок питания установлен сверху. Полка модуля компенсации дисперсии DCM и полка концентраторов установлены в основании статива.

В одном стативе может быть смонтировано до трех подстативов в верхней, средней и нижней частях статива. Для каждого подстатива имеется блок вентиляторов и воздушный фильтр.

Подстатив OptiX BWS 1600G разделен на четыре части: верхняя часть – это область выхода интерфейсных кабелей или, проще говоря, область интерфейсов. Здесь подключаются все внешние электрические интерфейсы, принадлежащие подстативу.

Средняя часть предназначена для установки плат и называется областью установки плат.

В нижней части помещаются область для прокладки оптоволоконных кабелей и блок вентиляторов.

Рассмотрим по подробнее область установки плат:

Всего в стативе находится 13 разъемов (IU1-IU13), которые пронумерованы слева направо как IU1, IU2, IU3 … IU13. Разъем IU7 имеет ширину 24 мм. и зарезервирован для SCC/SCE (Платы: управления системой и связи). Остальные разъемы IU (блоков интерфейсов) имеют ширину 38 мм. Все оптические интерфейсы выводятся на передние панели плат.

На рисунке 2.1 представлен фасад DWDM-оборудования, на котором изображено расположение используемых плат.



V40 – блок мультиплексирования на 40 каналов,
FIU – блок интерфейса оптоволоконного кабеля,
SCC и SCE – блок связи и управления системой,
MCA – многоканальный блок анализатора спектра,
D40 – блок демультиплексирования на 40 каналов,
OPU – блок оптического предварительного усилителя,

LWFS – блок преобразования длины волны линии приема-передачи STM64 с функцией FEC,

OAE – блок оптического усилителя

Рисунок 2.1 - Фасад DWDM оборудования

По мере роста трафика пропускная способность может быть увеличена, причем наращивание каналов будет проходить без прерывания работы сети. С введением в эксплуатацию DWDM-сети оператор сможет предлагать каналы большой емкости, что позволит воспользоваться услугами новым клиентам, которым требуется оперативно передавать очень большие объемы информации.

Преимущества DWDM очевидны. Эта технология позволяет получить наиболее масштабный и рентабельный способ расширения полосы пропускания волоконно-оптических каналов в сотни раз. Пропускную способность оптических линий на основе систем DWDM можно наращивать, постепенно добавляя по мере развития сети в уже существующее оборудование новые оптические каналы.

* 1. **Структура системы**

Механическая структура системы DWDM OptiX BWS 1600G включает в себя шкаф, подстатив, платы, блок вентиляторов, блок питания и т.д.. В шкаф могут устанавливаться подстативы с различными конфигурациями плат для формирования различных типов оборудования.

Компактное и изящное конструктивное исполнение позволяет более эффективно использовать пространство для установки оборудования. Конфигурация OTM с пропускной способностью 400 Гбит/с может быть реализована с использованием двух шкафов, а одиночный шкаф обеспечивает реализацию конфигурации OLA.

Один шкаф позволяет установить три подстатива, блок питания, полку DCM и полку HUB. В одной полке HUB можно установить максимум два концентратора (HUB), и в полке DCM также устанавливаются максимум две DCM.

В системе имеется пять типов оборудования:

- Оптический оконечный мультиплексор (OTM, Optical terminal multiplexer);

- Оптический линейный усилитель (OLA, Optical line amplifier);

- Оптический мультиплексор вставки/выделения (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer);

- Регенератор (REG);

- Оптический корректор (OEQ, Optical equalizer).

В каждом типе оборудования могут быть сконфигурированы до 40 каналов.

**2.3Оптический оконечный мультиплексор (OTM)**

OTM является оконечной станцией сети DWDM, то есть в этой станции для услуг внешнего оборудования реализуется доступ к сети DWDM.

На стороне передачи он осуществляет преобразование и мультиплексирование оптических сигналов, поступающих из различного оборудования на стороне клиента, например из оборудования SDH, в одну волоконно-оптическую линию для их усиления и последующей передачи. На стороне приема происходит демультиплексирование всех каналов и их транспортировка к соответствующему клиентскому оборудованию.

OTM системы состоит из следующих основных компонентов:

- Блок оптического ретранслятора (OTU, Optical transponder unit);

- Оптический блок мультиплексирования (M40);

- 40-канальный оптический блок мультиплексирования с VOA (V40);

- Блок оптического усилителя (OAU/OBU/OPU);

- Оптический блок демультиплексирования (D40);

- Блок интерфейса оптического волокна (FIU, Fiber interface unit);

- Блок однонаправленного оптического контрольного канала (SC1)/блок однонаправленного оптического контрольного канала и передачи синхронизации (TC1);

- Модуль компенсации дисперсии (DCM, Dispersion compensation module);

- Блок многоканального анализатора спектра (MCA, Multi-channel spectrum analyzer unit);

- Блок связи и управления системой (SCC, System control & Communication unit).



Рисунок 2.2 - Блок-схема принимающей стороны OTM

 **2.4 Оптический линейный усилитель (OLA)**

Блок OLA обеспечивает усиление двунаправленных оптических сигналов и компенсацию дисперсии. Блок OLA увеличивает дальность передачи без регенерации, то есть обеспечивает передачу без использования 3R-функции.

Как показано на рисунке 2.3, модуль OLA состоит из блока оптического усилителя, усилителя Рамана (комбинированное использование усилителей Рамана и EDFA обеспечивает усиление оптических сигналов с низким уровнем собственных шумов усилителей, что позволяет увеличить протяженность участка передачи), блоков DCM, FIU, SC2, SCC и т.д.



Рисунок 2.3 - Блок-схема OLA

Как и OTM, усилители Рамана используются на приемной стороне OLA, как показано на рисунке 2.3. Они выполняют усиление (с низким уровнем собственных шумов) оптических линейных сигналов, а затем посылают эти сигналы в блок FIU.

FIU выделяет оптический контрольный сигнал из основного тракта, для того чтобы система могла извлечь из него контрольную информацию. В то же время, сигналы C-диапазона, содержащиеся в основном тракте, передаются в блок OAU (блок эрбиевого оптического усилителя), где они усиливаются.

DCM обеспечивает компенсацию дисперсии сигналов основного тракта.

**2.4 Оптический мультиплексор с функцией вставки/выделения (OADM)**

В системе предусмотрено два типа мультиплексоров OADM: последовательный OADM и параллельный OADM.

Последовательный OADM используется для локальных операций вставки/выделения до 16 каналов в/из основного тракта путем каскадирования плат MR2. Это основной тип OADM. Он гарантирует баланс оптической мощности для локально вставляемых и транзитных каналов, выравнивая, таким образом, суммарную оптическую мощность.

Последовательный OADM состоит из блока оптического усилителя (OAU/OBU), модуля оптического мультиплексора с функцией вставки/выделения (MR2), блоков DCM, OTU, FIU, SC2/TC2, SCC и т.д. Блок-схема последовательного OADM показана на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 - Блок-схема последовательного OADM

Главным функциональным блоком OADM является MR2. Каждая плата MR2 поддерживает вставку/выделение двух каналов услуг. Возможно каскадное включение восьми плат MR2, в результате чего обеспечивается вставка/выделение 16 каналов, как показано на рисунке 2.4.

На стороне приема блок FIU разделяет основной тракт на сигналы C-диапазона и оптический контрольный сигнал. Затем сигнал контрольного канала передается в SC2/TC2 для дальнейшей обработки. Сигналы C-диапазона передаются на платы MR2, на которой осуществляется вставка или выделение каналов услуг. Доступ к этим локальным вставляемым/выделяемым каналам осуществляется через OTU.

На стороне передачи регулируемый оптический аттенюатор выполняет регулировку поступающих сигналов в соответствии с установленными в системе требованиями по мощности и передает их на плату MR2. Затем все сигналы усиливаются в OBU. На последнем этапе блок FIU снова объединяет сигналы каналов C-диапазона и контрольного канала для их передачи по волоконно-оптической линии.

**2.5 Регенератор**

Достаточность OLA для передачи сигналов на большие расстояния уже обсуждалась. Но из-за стохастического характера распространения света в некоторых случаях при передаче на большие расстояния необходимо регенерировать исходные сигналы для устранения дисперсии, потери мощности, оптического шума, нелинейности или PMD-эффектов. Регенератор (REG) выполняет 3R-обработку, то есть

восстановление первоначальной формы сигналов (reshaping), восстановление тактовой синхронизации (re-timing) и регенерацию сигналов. REG увеличивает дальность передачи путем регенерации оптических сигналов.

Как показано на рисунке 2.5, станция REG состоит из блоков OAU, D40, OTU, M40, FIU, SC2 и SCC.



Рисунок 2.5 - Блок-схема REG

Следует отметить, что функционально два включенных встречно OTM образуют REG. Единственное отличие заключается в том, что REG не поддерживает вставку/выделение оптических сигналов подобно OTM. Все блоки обработки сигналов и функциональные блоки REG аналогичны блокам OTM, за исключением типа OTU. В REG используется OTU с поддержкой функции регенерации, который реализует 3R-функцию.

 **2.6 Оптический корректор**

В системе передачи на сверхдальние расстояния (ELH) протяженность участка передачи без применения регенератора значительно больше по сравнению с системами передачи на большие расстояния, в связи, с чем могут возникать следующие проблемы:

- Накопление неравномерности распределения коэффициентов усиления оптического усилителя и распределения коэффициентов затухания в волоконно-оптической линии вызывают нарушение равновесия (баланса) между величиной оптической мощности и отношением “оптический сигнал/шум” на стороне приема;

- Поскольку крутизна дисперсии DCM не полностью соответствует характеристикам волоконно-оптических линий, невозможно обеспечить полную компенсацию по всем длинам волн и дисперсия на приемной стороне не соответствует требованиям системы.

Для реализации более качественной коррекции оптической мощности и компенсации дисперсии в системе ELH должен использоваться модуль OEQ.

Оборудование OEQ состоит из корректора оптической мощности и корректора дисперсии.

Корректор оптической мощности. Существует два решения этой проблемы: использование блока динамической коррекции коэффициента усиления (DGE, dynamic gain equalizer unit) для выравнивания оптической мощности каналов в основном тракте и использование блока VMUX.

Коррекция оптической мощности означает, что энергия оптических сигналов всех каналов устанавливается приблизительно равной друг другу для улучшения эффективности передачи.

В системе передачи на сверхбольшие расстояния связывается большое количество оптических усилителей. Поскольку АЧХ оптических усилителей не является прямоугольной, при усилении спектр сигнала изменяется. После прохождения оптических сигналов через несколько усилителей частотная равномерность спектра значительно снижается. Таким образом, ухудшается соотношение сигнал-шум, возрастают битовые ошибки, и эффективность передачи всей системы ограничивается. Для решения вышеупомянутых проблем используется плата DGE, регулирующая плоскостность спектра.

Корректор дисперсии применяется для систем передачи на большие расстояния, использующих технологию SuperWDM. Если расстояние передачи без регенерации превышает 1000 км (благодаря применению технологии SuperWDM), то должна учитываться необходимость коррекции дисперсии. Система передает мультиплексированные сигналы в модуль компенсации дисперсии для выполнения компенсации скорректированной дисперсии посредством платы DSE.

Корректор дисперсии может быть установлен вместе с корректором оптической мощности на одной и той же станции. Рекомендуется устанавливать его на стороне приема последней станции в секции оптического мультиплексирования.

2.7 Выбор оптического кабеля

Выбор типа оптического кабеля определяется пропускной способностью линейного тракта ВОСП, также учитываются условия и место его прокладки, наличие на трассе источников электромагнитных полей, опасность повреждения.

При выборе конструкции кабеля для определённого назначения следует учесть ряд аспектов, к которым следует отнести:

- соответствие кабеля ГОСТ, ТУ, которые разрабатываются в соответствии с требованиями ITU-T (Международный союз электросвязи - сектор стандартизации телекоммуникации), IEC (Международная электротехническая комиссия), и CECC (комитет по электронным компонентам в составе CENELEC);

- соответствие ОК необходимым эксплуатационным характеристикам. При определении пропускной способности волокна следует учитывать потери волокна и требования по их изменению. Эти характеристики должны удовлетворять самым жестким условиям, которые наблюдаются при эксплуатации;

- кабель должен быть удобным в работе и при монтаже. Он должен иметь гибкость, цветовое кодирование, малый вес, сопротивление изгибам, раздавливанию и растяжению, создавать условия для быстрого монтажа и надёжной эксплуатации;

- кабель должен быть удобным в сварке и заделке в концевые устройства. Удобная идентификация кабеля и волокна облегчает сварку и делает её более точной. Внешние защитные оболочки и покрытия должны легко сниматься. Важным моментом является скол волокон и подгонка волокна и кабеля, а, также предохранение места сварки;

- кабель должен иметь удобную маркировку, которая способствует быстрому ремонту и сокращает время простоя кабельных магистралей;

- кабель должен соответствовать предъявляемым требованиям с учётом специфических климатических условий на месте эксплуатации. При выборе нужной конструкции кабеля для заданного назначения следует учитывать условия окружающей среды, в которой кабель будет эксплуатироваться.

По всем параметрам нам подходит кабель типа ДПТ. Кабель представлен на рисунке 2.8:



1 – центральный силовой элемент стеклопластиковый стержень;
2 – ПБТ трубка со свободно уложенными оптическими волокнами и гидрофобным заполнителем;
3 – кордель;

4 – гидрофобный заполнитель;
5 - промежуточная ПЭ оболочка;
6 – Повив из арамидных нитей;
7 – наружная ПЭ оболочка

Рисунок 2.8 – Оптический кабель марки ДПТ – 024 Н 06 – 04.

Характеристики кабеля представлены в таблице 1.1 и волокна в таблице 1.2.

Таблица 1.1 - Характеристики кабеля.

|  |  |
| --- | --- |
| Количество оптических волокон в кабеле | 24 |
| Количество оптических волокон в модуле | 6 |
| Количество модулей в кабеле | 4 |
| Диаметр кабеля, мм | 12 |
| Масса кабеля, кг/км | 110 |
| Минимальный радиус изгиба, мм | 230 |
| Стойкость к продольному растяжению, кН | 4 |

Продолжение таблицы 1.1

|  |  |
| --- | --- |
| Стойкость к раздавливающим усилиям, кН/см | 0,5 |
| Стойкость к удару, Дж | 30 |
| Температурный диапазон эксплуатации, оСТемпературный диапазон при прокладке, оС | -60…+70-10…+50 |

Таблица 1.2 - Характеристики волокна.

|  |  |
| --- | --- |
| Тип волокон | Одномодовое со смещенной нулевой дисперсией (ITU-T G.655) |
| Рабочая длина волны волокна, нм | 1530-1565 |
| Коэффициент затухания, дБ/км, не более: | 0,22 |
| Коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм.км), в интервале длин волн (1530-1565) нм, по абсолютной величине | 3 |
| Поляризационная модовая дисперсия (ПМД), пс/км, не более | 0,5 |
| Длина волны отсечки, нм, не более | 1470 |
| Диаметр модового поля, мкм, на длине волны 1550 нм | 9,50,5 |
| Неконцентричность сердцевины относительно оболочки, мкм, не более | 0,8 |
| Диаметр оболочки, мкм | 1251,0 |
| Некруглость оболочки, %, не более | 1 |
| Диаметр защитного покрытия, мкм | 24510 |

3.**Обоснование технических требований к основным компонентам системы DWDM**

Основное требование к компонентам DWDM состоит в том, что они должны одинаково обрабатывать все каналы на всем протяжении оптического пути линии связи. Для этого требуется тщательный выбор оптических передатчиков, мультиплексоров, демультиплексоров, усилителей и волокна. При объединении отдельных компонентов в единую систему, небольшие различия их характеристик могут накапливаться и непредсказуемым образом влиять на параметры сети в целом. Для обеспечения гарантированной надежной сети, необходимо выполнять тестирование не только каждого компонента в отдельности, но и всей системы в целом. Важным становится контроль качества оптических характеристик и поведения системы, начиная от производства компонентов, завершая этапом системной интеграции. Такой контроль будет гарантировать ввод системы DWDM в эксплуатацию с расчетными параметрами длительную и устойчивую работу.

Для надежной работы к компонентам системы DWDM предъявляются такие требования, как достаточное количество мультиплексированных каналов, малые вносимые потери, эффективное уменьшение перекрестных помех, широкая полоса пропускания и т.д.

**3.1 Мультиплексоры и демультиплексоры**

Как показано на рисунке 3.1 основная функция мультиплексора заключается в объединении нескольких длин волн сигналов по одному оптическому волокну. Основная функция демультиплексора заключается в разделении нескольких длин волн сигналов, передаваемых по одному оптическому волокну. Мультиплексор и демультиплексор являются одинаковыми по принципу действия и требуют только изменения направлений входа и выхода.



Рисунок 3.1 - Мультиплексор и демультиплексор

Оптическое мультиплексирование и демультиплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. В частности, для фильтрации применяют тонкопленочные фильтры, волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки, сварные биконические волоконные разветвители, фильтры на основе жидких кристаллов, устройства интегральной оптики. В настоящее время наибольшее распространение получили устройства оптического мультиплексирования и демультиплексирования с частотным интервалом между отдельными каналами в 100 ГГц (~0,8 нм). Появляющиеся в последнее время мультиплексные устройства могут обеспечить большую плотность размещения каналов с частотным интервалом 50 ГГц и меньше на тонкопленочном фильтре.

3.1.1 Характеристики мультиплексоров – демультиплексоров

Хотя технологии при изготовлении мультиплексоров и демультиплексоров схожи, изготовление последних является более сложной задачей. Демультиплексор характеризуется параметром, который называют изоляцией – способностью изолировать друг от друга входные и выходные каналы, а мультиплексор характеризуется направленностью. Чем меньше значения каждого из этих параметров, тем выше характеристики устройства. По мере уменьшения интервала между каналами и увеличения числа каналов изготовление демультиплексора становиться более сложным.

Полоса пропускания каждого канала характеризуется следующими параметрами: центральная длина волны, интервал между каналами, полоса пропускания по уровню –3 дБ, изоляция и дальние перекрестные помехи, неравномерность пика мощности в спектре канала и однородность каналов. Рассмотрим подробнее значения каждого из этих параметров.

Центральная длина волны – это среднее арифметическое значение верхней и нижней длины волны отсечки. Длины волн отсечки – это длины волн, на которых вносимые потери достигают заданного уровня. Часто относительные слабые отклонения в форме спектра приводят к заметному изменению центральной длины волны. Номинальную длину волны передатчика стараются делать как можно ближе к центральной длине волны, как правило, это одна из длин волн соответствующих частотному плану ITU.

Интервал между каналами должен соответствовать частотному плану системы DWDM. Используются как равномерные, так и неравномерные частотные сетки каналов. Наиболее распространенным является частотный план ITU с равномерным частотным интервалом между каналами 100 ГГц. Неравномерные интервалы между каналами могут применяться для того, чтобы минимизировать или устранить нелинейность четырехволнового смешения, когда в результате нелинейного взаимодействия излучения в волокне на двух или более частотах возникают сигналы с новой частотой. При неравномерных интервалах между каналами четырехволновое смешение может привести к дополнительным шумам на длинах волн, не используемых для передачи полезного сигнала. Новый паразитный сигнал может совпасть по частоте с существующими сигналами других каналов, что может привести к возникновению перекрестных помех, при использовании равномерных интервалов между каналами.

Полоса пропускания по уровню –3 дБ. Полоса пропускания – это та часть спектра передаваемого сигнала, в пределах которой все спектральные составляющие превышают некоторый пороговый уровень. Полоса пропускания определяет тот спектральный диапазон, в пределах которого устройство может быть эффективно использовано. Конкретное пороговое значение ширины полосы пропускания зависит от степени изоляции соседних каналов [4].

Изоляция и дальние перекрестные помехи. Изоляция канала и перекрестные помехи определяют уровень ослабления данного канала в других каналах, где этот сигнал не является основным. Изоляция определяется как минимальная величина ослабления мощности сигнала с выборкой по всем не основным выходным каналам по отношению к основному входному каналу. Перекрестные помехи определяют повышение уровня мощности входного сигнала на определенной длине волны на всей суммарной утекающей мощностью этого сигнала в не основные каналы. Помимо измерения или оценки уровня наихудших перекрестных потерь между каналами в системе необходимо также определять допустимые их уровни.

Неравномерность пика мощности в спектре канала. Пиковое значение вносимых потерь характеризует уровень потерь на фиксированной длине волны, но не определяет полностью разброс уровней потерь во всей полосе пропускания или в отдельном канале. Разброс уровней – это разность между минимальным и максимальным уровнями потерь в измеренной или номинальной полосе пропускания – называют неравномерностью потерь. Неравномерность распределения потерь канала предоставляет информацию о возможном разбросе уровня передаваемой мощности при изменении длины волны передатчика в пределах номинальной полосы пропускания. Большая неравномерность неприемлема во многих практических приложениях.

Однородность каналов является мерой разброса уровня передаваемой мощности или вносимых потерь от канала к каналу в мультиплексоре –демультиплексоре [5].

**3.2 Оптические усилители**

Как ключевой компонент новых систем оптической передачи, оптический усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA), имеет много преимуществ, а именно, высокий коэффициент усиления, большая выходная мощность, широкая рабочая оптическая полоса пропускания, независимость поляризации, низкий коэффициент шума и характеристики усиления не имеют зависимости от скорости передачи и формата данных.

Усилители EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно, обладают низким уровнем шумов, а их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна как показано на рисунке 3.2. Именно благодаря появлению усилителей с таким сочетанием качеств линии связи и сети на основе систем DWDM стали экономически привлекательными.



Рисунок 3.2 - Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны

Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. В простейших конструкциях EDFA усиление происходит в достаточно узком диапазоне длин волн – примерно от 1525 нм до 1565 нм. В эти 40 нм умещается несколько десятков каналов DWDM. EDFA полностью "прозрачны" – не зависят от используемых протоколов, форматов, скорости передачи и (в пределах указанных выше ограничений) длины волны оптического сигнала. Поскольку усилители EDFA независимы от сетевого протокола, их можно подключать непосредственно к различному оборудованию – коммутаторам ATM или компонентам протокола IP – не опасаясь, что они помешают друг другу. Такая гибкость – одно из основных преимуществ использования их в системах DWDM. Наряду с этим, при использовании усилителей EDFA требуется тщательно учитывать их неоднородное спектральное усиление и шум, вносимый ими за счет усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission). Сети с усилителями EDFA имеют многочисленные преимущества. Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности.

Усилитель EDFA обеспечивает в системе OptiX BWS 1600G усиление сигналов C-диапазона. В оптическом усилителе реализованы функции фиксации коэффициента усиления и управления переходными процессами, позволяющие поддерживать коэффициент усиления каждого канала на определенном уровне независимо от количества каналов и избегать возникновения большого числа битовых ошибок в существующих каналах во время вставки или выделения каналов.

3.2.1 Классификация усилителей по способам применения

Усилители EDFA могут использоваться по разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления. Применения различают предварительные усилители, линейные усилители и усилители мощности.

*Предварительные усилители* (предусилители) устанавливаются непосредственно перед оптическим приемником терминального оборудования или на выходе оборудования регенерации. Основная функция данного усилителя заключается в усилении малых сигналов, ослабленных во время передачи по каналу , и увеличении приемной чувствительности оптического приемника. Оптические предусилители часто используются в качестве замены сложных и обычно дорогих когерентных оптических приемников.

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

*Усилители мощности* (бустеры) устанавливаются непосредственно после лазерных передатчиков и предназначены для дополнительного усиления сигнала до уровня, который не может быть достигнут на основе лазерного диода. Бустеры могут также устанавливаться перед оптическим разветвителем, например при передаче нисходящего трафика в гибридных волоконно-коаксиальных архитектурах кабельного телевидения .



Рисунок 3.3 - Применение разных типов оптических усилителей

Оптический усилитель имеет три существенных преимущества перед регенератором. Во-первых, оптический усилитель конструктивно проще. Во-вторых, оптический усилитель в отличие от регенератора, не привязан к протоколу или скорости передачи и может преобразовывать (усиливать) входной сигнал любого формата. В третьих, оптический усилитель способен одновременно усиливать большое число независимых спектрально разделенных каналов, в то время как регенератор может обрабатывать только один канал, одну длину волны. Перечисленные преимущества оптического усилителя настолько сильны, что отодвигают один из его главных недостатков на задний план – оптический усилитель вносит шум.

**3.3 Передатчики**

Современные передатчики имеют гибридную конструкцию. Лазеры и интегральные микросхемы, модулирующие излучение, объединены в единый компактный модуль, что позволяет достичь больших частот модуляции и высокой надежности. Такой модуль является электронно-оптическим преобразователем, в котором интенсивность выходного светового сигнала модулируется входным цифровым электрическим сигналом. При низких скоростях передачи модулируется управляющий ток (лазеры с внутренней модуляцией), при высоких – сам оптический сигнал (лазеры с внешней модуляцией). В системах DWDM наиболее широко применяют специализированные лазеры с распределенной обратной связью (DFB), предназначенные для работы в окне 1550 нм и обеспечивающие скорость передачи до 10 Гбит/с [4].

Полоса пропускания системы DWDM распределяется между многочисленными каналами с различными длинами волн. Все эти длины волн должны разместиться в рабочей области усилителя. Если в системе много каналов, то каждый из них необходимо тщательно контролировать. Успешное решение данной задачи определяется характеристиками источников излучения каждого канала. Системы DWDM с малым частотным интервалом можно использовать только при наличии лазера с узкой линией излучения. Узкая ширина линии минимизирует искажения импульсов, вызываемых дисперсией волокна, позволяет применять на входе перед приемником узкополосные фильтры для улучшения отношения сигнал/шум. Сильное подавление остаточных боковых полос источника излучения применяется для того, чтобы сигнал источника не взаимодействовал с другими каналами.

Передатчик не должен менять длину волны излучения со временем, т.е. оставаться в пределах полосы пропускания канала системы. Лазер оптически изолируют и на него не должны влиять паразитные отражения от среды передачи, особенно возвращающиеся от первого оптического усилителя в линии связи. Эффект старения в системах DWDM – это предельная мощность, длина волны максимума излучения и подверженность чирпированию (уширение линии излучения) источника излучения при долговременном и кратковременном использовании. Данный эффект должен оставаться в допустимых пределах.

Лазерные источники должны быть защищены от обратных отражений, так как они могут вызвать нестабильность генерации источника. Лазерные модули сами по себе довольно дороги и их замена может потребовать сложной и дорогостоящей операции по разборке и последующей перенастройки компонентов, обеспечивающих эффективную работу линии. Поддержка постоянной температуры лазерного источника обеспечивается термоэлектрическими холодильниками, которые поглощают ту часть энергии, которая не преобразуется в световую. Она рассеивается в виде тепла и влияет на характеристики лазера (длина волны, мощность) и вызывает нестабильность.

**3.4 Фотоприемники**

Оптический фотоприемник преобразует входные оптические сигналы в электрические и осуществляет, таким образом, их демодуляцию. Фотоприемник должен быть полностью совместим с передатчиком как по спектральной области чувствительности в пределах номинальных длин волн, так и временным характеристикам модуляции излучения. Кроме того, фотоприемник должен обладать устойчивостью к ошибкам, которые могут возникнуть в сигнале при прохождении других оптических компонентов.

Оптический сигнал подается на фотоприемник непосредственно из волокна, что обеспечивается традиционным способом – их торцевой стыковкой. Полученный на фотоприемнике электрический сигнал необходимо усилить до требуемого уровня, внеся при этом как можно меньше шумов. Может понадобиться также электронная фильтрация, для сглаживания эффективного частотного отклика усилителя. Все эти операции выполняются одним гибридным модулем, на который поступает входной оптический сигнал из волокна. Обычно в качестве фотоприемников используется два типа фотодиодов: PIN- фотодиоды и лавинные фотодиоды APD.

Важнейшие характеристики при выборе фотоприемника – это спектральная чувствительность, пороговая чувствительность, динамический диапазон, уровень шума. Эффективность приемника измеряется относительным уровнем ошибок по битам BER, которые он может обеспечить.

Необходимо также учитывать окружающие условия и конструктивные особенности, включая размер, вес, требуемую мощность и приемлемую температурную чувствительность приемника (особенно для лавинных фотодиодов), а также простоту его обслуживания и замены.

**3.5 Компенсаторы дисперсии**

Оптическое волокно и некоторые компоненты систем DWDM обладают хроматической дисперсией. Показатель преломления волокна зависит от длины волны сигнала, что приводит к зависимости скорости распространения сигнала от длины волны (материальная дисперсия). Даже если показатель преломления не зависел бы от длины волны, сигналы разных длин волн все равно распространялись бы с разной скоростью из-за внутренних геометрических свойств волокна (волноводная дисперсия). Результирующее воздействие материальной и волноводной дисперсий называется хроматической дисперсией.

Хроматическая дисперсия приводит к уширению оптических импульсов по мере их распространения по волокну. При большой протяженности линии связи это проявляется в том, что близко идущие импульсы начинают перекрываться, ухудшая сигнал.

Эффективная методика компенсации дисперсии заключается в умении правильно измерять как полную дисперсию основного волокна, так и коэффициент дисперсии корректирующего волокна, а также возможность проверки того, что компенсирующее волокно расчетной длины действительно устранило дисперсию.

Волокно с компенсацией дисперсии является основным компонентом при статическом подавлении хроматической дисперсии. Его отрицательная хроматическая дисперсия в несколько раз превышает положительную хроматическую дисперсию одномодового волокна. Добавление участка волокна с компенсацией дисперсии определенной длины компенсирует дисперсию линии передачи, обращая ее в ноль. Для систем передачи DWDM необходимо также компенсировать и различные наклоны дисперсионных характеристик для разных длин волн передачи. Так как наклоны в основном и компенсирующем волокне не совпадают точно, то и не происходит идеального зануления дисперсии. В итоге, накопленная дисперсия системы передачи изменяется с длиной волны как показано на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Статическая компенсация хроматической дисперсии.

Она оставляет слабую волновую зависимость полной дисперсии в некотором диапазоне длин волн, поэтому с увеличением расстояния передачи разброс накопленной дисперсии увеличивается.

Компенсация может также осуществляться и с помощью дискретных компонентов, таких как брэгговские дифракционные решетки [4].

Для системы OptiX BWS 1600G наиболее подходящие оптоволоконные кабели G.655 и G.652. Они имеют положительный коэффициент дисперсии и положительный наклон дисперсии в диапазоне 1550нм. После передачи оптического сигнала на определенное расстояние накопление положительной дисперсии расширяет оптический импульс сигнала. Это сильно влияет на эффективность передачи системы. Для минимизации этого эффекта в сети применяется DCM (модуль компенсации дисперсии). DCM имеет отрицательный наклон дисперсии для компенсации положительной дисперсии передачи оптоволоконного кабеля, таким образом поддерживается первоначальная форма импульса сигнала.

Система OptiX BWS 1600G имеет различные модули компенсации дисперсии для диапазонов С и L (нас интересует С-диапазон):

Диапазон С, применяемый для оптоволоконного кабеля G.655: DCM-10, DCM-20, DCM-40, DCM-80, DCM-100.

**3.6 Аттенюаторы**

В линии связи после оптического передатчика часто устанавливают аттенюаторы, которые позволяют уменьшить их выходную мощность до уровня, соответствующего возможностям расположенных далее мультиплексоров и усилителей EDFA.

Применение мощных лазеров в передатчиках оправдано при отказе от необходимости использования промежуточных усилителей сигнала на линии. При этом на определенных участках сети может понадобиться ослабление мощности сигнала с помощью аттенюатора, чтобы большая мощность сигнала не приводила к нелинейным явлениям в некоторых компонентах систем DWDM. Избирательное (по длинам волн) ослабление мощности часто требуется и для того, чтобы “выровнять” спектр сигнала на входе усилителя EDFA и обеспечить равномерное усиление для всех каналов. Это особенно важно, когда в усилителе EDFA происходит добавление или выделение каналов.

На рисунке 3.5 изображен механически регулируемый оптический аттенюатор OptiX BWS 1600G.



Рисунок 3.5 - Механически регулируемый оптический аттенюатор

Поворот регулировочного винта по часовой стрелке приводит к увеличению значения затухания, т. е. к уменьшению выходной оптической мощности. Поворот регулировочного винта против часовой стрелки приводит к уменьшению значения затухания, т. е. к увеличению выходной оптической мощности. Оптический аттенюатор является высокочувствительным прибором, поэтому регулируют оптическую мощность с малым шагом.

**4.Измерения и настройка систем DWDM**

Применение технологии DWDM дает многочисленные преимущества, однако требует высокого уровня подготовки технического персонала и современного контрольно-измерительного оборудования.

После того, как система полностью смонтирована, необходимо провести измерения оптических и электрических характеристик линии связи и убедиться, что каждый канал работает на заданной длине волны, а все элементы системы спектрально выровнены в соответствии с техническими требованиями. С разработкой и появлением систем DWDM возникли и новые методы тестирования и контроля, позволяющие убедиться, что каждый компонент и набор компонентов работают корректно и обеспечивают заданные характеристики.

Определить характеристики сигналов и компонентов DWDM на порядок сложнее, чем при тестировании технологий с передачей сигнала на фиксированной длине волны. По мере развития технологии плотного волнового уплотнения частотные интервалы между каналами уменьшаются, эксплуатационные характеристики и требования к компонентам становятся все выше, а процедуры тестирования все сложнее. Такие оптические параметры, как вносимые потери, затухание при отражении, поляризационные эффекты, должны тестироваться для целого диапазона длин волн. А новые параметры, такие, как ширина полосы частот и перекрестная связь каналов, становятся не менее критичными для характеристики системы. Основные производители тестового оборудования незамедлительно отреагировали выпуском полнофункциональных и автоматических анализаторов оптического спектра специально для тестирования систем DWDM. Продолжающееся внедрение и возрастающая сложность компонентов DWDM поднимают вопрос об интеграции с существующими системами связи технологий их контроля, а также полной автоматизации испытаний.

* 1. **Параметры сигналов и компонентов**

Конечной целью измерений параметров сигналов в системах DWDM является проверка работоспособности линии, по которой идет множество информационных потоков, т. е. подтверждение того, что полезная информация не только передается по всему оптическому тракту и что ее можно выделить из общего сигнала на принимающей стороне.

Так как реальный сигнал имеет очень сложную структуру, к тому же меняющуюся во времени, то задачу контроля упрощают, измеряя несколько ключевых характеристик: спектральных, временных и поляризационных. Основными, конечно, являются параметры спектра, связывающие длину волны излучения и его мощность, измеренную в какой-либо точке оптического тракта. Анализ полученной зависимости позволяет достаточно точно судить о прохождении реальных сигналов, при условии незначительности нелинейных явлений, неизбежных в любой оптической системе. Важнейшими параметрами отдельного канала при контроле за реальными линиями являются центральная длина волны, максимальная мощность сигнала и ширина спектра канала.

Центральная длина волны, согласно рекомендации МСЭ, должна соответствовать одному из стандартных значений. В данном дипломном проекте применяется сетка каналов с шагом 100 ГГц.

Канальная мощность представляет интерес для расчета отношения сигнал/шум, что позволяет судить о надежности выделения полезной информации из пришедшего сигнала. Уровень шума при этом определяется по диаграмме спектра, точнее, по пороговому уровню сигнала. В протяженной линии, имеющей промежуточные усилители, на стадии строительства и ввода в эксплуатацию необходимо применять эталонные источники лазерного излучения, поскольку при расчетах используется так называемое «актуальное» отношение сигнал/шум как показано на рисунке 4.1, т. е. разница между полезным сигналом и уровнем аккумулированных шумов. В этом случае пороговый уровень включает в себя аккумулированные шумы и, соответственно, располагается выше.



Рисунок 4.1 - Влияние аккумулированного шума.

Чем длиннее линия, тем шире спектр сигнала, во-первых, из-за влияния нелинейных эффектов во всем волоконно-оптическом тракте и, главным образом, в усилителях, а во-вторых, в результате поляризационно-модовой дисперсии (Polarized Mode Dispersion, PMD) сигнала в оптическом кабеле. Контроль спектральной ширины канала особенно важен для систем с близко расположенными каналами, где даже небольшое расширение сигнала в спектральной области может означать его переход в соседнюю область.

Еще одна важная характеристика сигнала — стабильность указанных параметров во времени, в особенности стабильность центральной длины волны источника излучения в течение длительного времени, а также стохастические процессы вследствие, например, флуктуаций поляризационно-зависимых потерь на любом участке оптического тракта.

В идеальной системе DWDM демультиплексор должен выделить каждый компонент входного сигнала и направить его на отдельный выход, независимо от мощности сигнала в любом другом канале. Однако поведение реальных устройств отклоняется от описанного, и сигнал на выходе одного канала частично передается в другие каналы. Величина остаточного сигнала, появляющегося на различных выходах, определяется взаимным влиянием каналов (crosstalk).

Если измерения параметров тракта передачи дают неудовлетворительные результаты, то переходят к тестированию параметров отдельных компонентов: источников излучения, пассивных устройств и усилителей сигнала.

Пассивные оптические компоненты — соединительные муфты, мультиплексоры и демультиплексоры — характеризуются вносимыми потерями, связывающими длину волны тестирующего сигнала с мощностью сигналов на входе (каждом входе мультиплексора) и выходе (каждом выходе демультиплексора) устройства. При измерениях нелинейные эффекты обычно не учитываются, поскольку их практическая обработка слишком сложна. Поэтому о вносимых потерях судят только по нескольким параметрам работы каждого отдельного канала.

В первую очередь, это максимальные вносимые потери и соответствующая им центральная длина волны канала. Максимальные вносимые потери — критическая величина для работоспособности системы, от которой зависит амплитуда переданного сигнала. Если вносимые потери превышают суммарно допустимые потери системы, то сигнал нужно дополнительно усилить, чтобы компенсировать такое ослабление.



Рисунок 4.2 - Пропускная способность и полоса пропускания.

В системах DWDM всегда большое внимание уделяется взаимоувязке характеристик оптических фильтров. Вместо полной функции зависимости вносимых потерь от длины волны используются две близкие по смыслу величины — полоса пропускания (passband) и пропускная способность (bandwidth), показанные на рисунке 4.2. Ширина сигнала на уровне 1 дБ ниже максимума называется полосой пропускания, а ширина сигнала на уровне 20 дБ ниже максимума — пропускной способностью и относится обычно к устройствам фильтрации сигналов. При этом отношение указанных величин указывает на крутизну наклонов боковых сторон в диаграмме фильтра и существенно влияет на величину перекрестной связи каналов. Идеальные устройства должны иметь пропускную способность немногим более широкую, чем полоса пропускания, что позволило бы им производить практически полное подавление сигналов вне полосы пропускания светофильтра.

К пассивным элементам относится и волоконно-оптический кабель, основное влияние которого — вносимые потери, в том числе и поляризационно-зависимые. Обычно их эффект мал, но на протяженных линиях PMD начинает играть заметную роль. На прохождение сигнала в длинной линии оказывает значительное влияние и другой вид дисперсии — хроматическая, которая приводит к росту взаимного влияния соседних каналов.

Оптические усилители характеризуются, в первую очередь, своим коэффициентом усиления, зависящим, к сожалению, от длины волны. Для компенсации этой зависимости применяют дополнительные аттенюаторы. Кроме того, усилители вносят существенный вклад в межканальное влияние. Особенно сильно нелинейные эффекты проявляются при больших мощностях сигнала. Поэтому в современных системах суммарная мощность излучения по всем каналам не должна превышать 17 дБм. Проверка полной мощности сигнала до и после усилителя функционально необходима [6].

**4.2Методы измерения и контроля**

Измерение и контроль оптических сигналов и компонентов обычно производятся по одной из трех методик: в первой используют лазер с перестройкой частоты и измеритель оптической мощности, в другой — широкополосный источник излучения и оптический анализатор спектра; третья методика предназначена для контроля поляризационно-зависимых потерь.

Согласно первой схеме все каналы проверяются последовательно, для чего приходится так же последовательно перестраивать источник излучения (точность ±0,01нм).

Для изменения длины волны в них обычно применяется принцип Фабри-Перо. Фильтр Фабри-Перо состоит из двух частично отражающих пластин, интервал между которыми изменяется с помощью пьезоэлементов, управляемых электрически. Фильтр прозрачен для тех волн, которые при многократном отражении между пластинами синфазны, а поэтому усиливают друг друга. Для всех других длин волн происходит сильное ослабление. Собственно источниками излучения служат лазеры с внешним резонатором (External Cavity Lasers, ECL) или перестраиваемые полупроводниковые лазеры. Лазеры с перестройкой частоты дают излучение с точностью до 50 пм. В зависимости от требуемой точности, к системе тестирования может быть добавлен дополнительный измеритель длины волны. С добавочным измерителем длины волны точность измерения повыситься до 1 пм и выше. Для определения частоты тестируемого излучения эти приборы используют принцип генерации и сравнения интерферограмм внутреннего и исследуемого сигналов (точность ±0,0001нм).

Таким образом, на вход подается монохроматическое излучение для одного определенного канала. Далее мощность сигнала измеряется в различных точках оптического тракта, для чего можно использовать обычный оптический ваттметр. По полученным данным рассчитываются вносимые потери отдельных участков тракта либо тестируемых устройств.

Главный недостаток этого метода — временные затраты, необходимые для перевода излучения в желаемый диапазон длин волн, а также для проверки длины волны дополнительным устройством.

Второй метод предусматривает использование широкополосного источника излучения наподобие оптического светодиода (LED) или эрбиевого источника (ASE), а также анализатора оптического спектра (OSA).

Широкополосный источник излучает во всем спектре частот проверяемого устройства. Таким образом, измерения проводятся для всех длин волн. При этом дополнительные устройства не требуются, поскольку анализатор спектра разделяет излучение по длине волны для всего диапазона и измеряет передаваемую мощность для каждой длины волны отдельно.

**4.3Анализатор оптического спектра**

Анализаторы спектра — это новый вид приборов. Обычно OSA позволяют контролировать центральную длину волны, расстояние между соседними каналами, а также общие характеристики, такие, как мощность, отношение сигнал/шум и др. Однако их разрешающая способность зависит от используемой модели и обычно ограничена 0,1 нм.

Принцип работы анализатора спектра состоит в разделении светового потока на монохроматические компоненты с последующим измерением мощности каждой составляющей, т.е. OSA позволяет исследовать весь спектральный профиль сигнала в требуемом диапазоне длин волн. Далее профиль отображается на графике в координатах «длина волны—мощность». Таким образом, для мультиплексированного сигнала, проходящего по волокну системы DWDM, могут быть проанализированы и отображены оптические характеристики каждого канала, а также взаимовлияние разных каналов.

Использование дифракционной решетки — наиболее известный метод, применяемый для деления света на его компоненты (цвета). Параллельные линии на поверхности дифракционной решетки разделяют световой сигнал в оптический спектр. Как только сигнал разделен, мощность заданной длины волны может быть измерена путем установки детектора в месте максимальной концентрации света нужной длины волны.



Рисунок 4.3 - Схема действия простейшего OSA

На рисунке 4.3 схематически показано устройство самого простого OSA с фиксированным детектором — это так называемый однопроходный монохроматор. В выпускаемых сегодня OSA данная технология улучшена за счет применения новых дисперсионных решеток, многопроходных схем и более точных схем измерения мощности. Но подобные OSA все же недостаточно компактны, к тому же они требуют достаточно деликатного обращения — это типично лабораторные приборы. Анализаторам спектра, где для разделения сигналов используется интерферометр Майкельсона, вышеперечисленные недостатки присущи в полной мере. Сегодня наибольшее распространение получили анализаторы на основе перестраиваемых фильтров, главным образом, работающих по принципу Фабри-Перо.

Коэффициент оптического отклонения (Optical Rejection Ratio, ORR) — одна из важнейших характеристик OSA. Он характеризует максимальное значение отношения сигнал/шум, которое OSA может измерить в данном диапазоне при пиковом значении сигнала.

Основной интерес для пользователя OSA представляет детальное изображение реального спектрального профиля. Если ORR измерительного прибора оказывается ниже отношения сигнал/шум системы, то оператор получает график, на котором изображены скорее собственные ограничения такого прибора, чем реальное поведение оптического сигнала. Чем больше каналов и `уже интервал каждого, тем выше должен быть ORR для измерения той же мощности. Динамический диапазон по мощности отражает пропускную способность оптического детектора в OSA, т. е. способность измерить все различные уровни мощности, требуемые для приложений DWDM. Прибор с широким динамическим диапазоном позволяет точно измерить сигналы как высокой, так и низкой мощности, в результате чего получается более ясное изображение спектра.

Большинство современных высокоэффективных OSA представляют собой вставные модули, разработанные как для инсталляторов сетей, так и для исследовательских нужд. Эти модули могут также применяться и для автоматических измерений. С другой стороны, такие переносные OSA, пригодные для работы в полевых условиях, не уступают в оптической эффективности лабораторным приборам. Чаще всего переносные OSA опционально содержат батареи.

Инсталляция систем DWDM и поиск неисправностей в них требуют от OSA процедур гораздо более сложных, чем обычное тестирование. Оптическое волокно должно быть проверено на общие потери, ORL, дисперсию в режиме поляризации и т.д. Для ситуаций, где необходима очень высокая точность измерения длины волны, совместно с OSA может быть задействован монохроматор — измеритель длин волн..

Подобный универсальный анализатор подходит для контроля служебных каналов (Optical Supervisory Channel, OSC), используемых для мониторинга систем DWDM. Для таких каналов выделяют одну из следующих длин волн — 1510, 1625 или 1490 нм.

Стандартные анализаторы позволяют точно определить все оптические параметры, но, вместе с тем, не обеспечивают анализа битовых ошибок. Поэтому при использовании для наладки и контроля информационных оптических сетей OSA должны иметь специальный выход для подключения тестера коэффициента битовых ошибок. В этом случае внутренний фильтр в OSA настраивается на требуемую длину волны для выделения соответствующего канала в системе DWDM и передачи сигнала на анализатор ошибок.

**4.4Анализ поляризационно-зависимых потерь**

В технологии DWDM существенное влияние на качество передачи информации также оказывают поляризационно-зависимые потери (Polarization Dependet Loss, PDL), т. е. различие в потерях по-разному поляризованных мод излучения. Фотоприемник реагирует на комбинацию этих мод, и результирующий импульс света хаотически изменяется по амплитуде. Чтобы избежать порождаемых таким явлением нежелательных эффектов, оптические характеристики устройств тракта DWDM должны быть слабо чувствительными к поляризации излучения.

Производители волокна хорошо понимают, насколько важно поддерживать близкую к идеальной геометрию сердцевины по всей длине волокна, и стараются не создавать излишних изгибов и напряжений при перематывании кабеля на катушки. Операторы сетей связи научились учитывать воздействие внешних условий на явление PMD.

Мгновенное значение PMD для конкретной длины волны может меняться со временем. Однако тесты, выполняемые в реальных условиях интерферометрическим методом, показывают, что усредненное по длинам волн значение PMD относительно стабильно. Важно измерять PMD в реальных условиях эксплуатации сети.

Наличие PDL выражается в максимальном изменении мощности сигнала на выходе устройства. При расчете полных вносимых потерь и величины перекрестной связи устройств DWDM необходимо вводить поправку на PDL. Потенциальные неисправности системы, вследствие чрезмерной чувствительности компонентов к виду поляризации сигнала, могут быть минимизированы, если каждый компонент протестировать по величине PDL, а затем включить в расчет величины общих потерь системы самый худший вариант.

PDL могут быть измерены одним из двух методов, для каждого из которых требуется специальный поляризационный контроллер, способный генерировать сигнал с различной поляризацией.

Первый подход использует контроллер для генерации сигналов различной поляризации. Оптические потери вычисляются по наблюдаемой выходной мощности прошедшего сигнала. Максимально наблюдаемые потери на выходе принимаются за величину PDL тестируемого устройства. Данный метод представляется трудоемким, поскольку для определения величины поляризационно-зависимых потерь требуется провести целую серию измерений.

Второй подход состоит в том, что на проверяемое устройство подается набор сигналов определенных видов поляризации: горизонтальной, вертикальной, диагональной и правой круговой поляризации. Чтобы вычислить PDL по зарегистрированной для каждого состояния выходной мощности, применяется анализ Мюллера-Стокса. Главное преимущество этого подхода — минимум измерений.

Важнейшие параметры практически всех многочисленных компонентов, используемых в системах DWDM, могут зависеть от температуры и влажности, поэтому обеспечение работоспособности системы при всех возможных изменениях компонентов выглядит проблематичным. Чтобы обеспечить высокую управляемость измерительной системы на всех этапах тестирования, необходимо выработать методики, позволяющие тестировать в одной измерительной процедуре как можно большее число параметров желательно всех устройств, или набор методик, использующих одну и ту же измерительную установку. Там, где это возможно, используют полностью автоматизированные процедуры тестирования и компьютеризованные средства сбора, обработки, отображения и анализа данных.

Современный модульный подход к построению измерительного оборудования упрощает эту задачу. Модули, имеющие общую структуру и командный язык управления, можно соединять многочисленными способами и удовлетворять при этом требованиям большинства измерительных процедур. Программное обеспечение управления измерительными установками позволяет перепрограммировать процедуры измерений на языках высокого уровня.

**4.5Рефлектометрические измерения**

Оптический рефлектометр OTDR (Optical time-domain reflectometer) представляет собой электронное устройство, и являются наиболее полнофункциональным прибором для эксплуатационного анализа оптических кабельных сетей.

Наиболее распространены рефлектометры, использующие принцип измерения уровня обратного рассеяния. Мощность отраженного или рассеянного в обратном направлении света измеряется и изображается на экране дисплея. С помощью рефлектометра можно оценить распределение затухания по длине линии, определить местонахождение неоднородностей и оценить степень их влияния на передаваемый сигнал. Рефлектометр удобен для диагностики состояния волокна, позволяет проводить измерения с одного конца волокна.

По рефлектограмме определяют:

- общие потери в волокне и его коэффициент затухания;

- распределение потерь по длине волокна;

- расположение муфт (сварных и механических соединений и потери в них;

- место повреждения волокна;

- оптическую длину волокна.

Динамический диапазон рефлектометров находится в пределах 25-40 дБ, что позволяет им измерять ОВ длиной до 200 км.

Встроенный процессор и соответствующее программное обеспечение делают возможной скоростную автоматическую обработку данных, усовершенствованный фильтр и возможность многократного (до 1 млн.) усреднения результатов измерений позволяют обнаружить и измерить локальные потери точнее 0.01 дБ.

В настоящее время полномасштабные рефлектометры используются в тех случаях, когда необходимы очень высокие разрешение и динамический диапазон. К сожалению, эти технологические преимущества не позволяют уменьшить размеры и вес приборов. С другой стороны, требование миниатюризации измерительных приборов является сильным стимулом развития волоконно-оптической техники. Данное требование привело к созданию рефлектометров вчетверо меньших, чем стационарные рефлектометры, и менее дорогих. Мини-рефлектометры уступают стационарным по своим возможностям, но иногда превосходят их по уровню автоматизации измерений.

Принцип работы оптического рефлектора (Optical time – domain reflectometer) основан на обратном рассеянии света при прохождении через волокно. Рассеянный назад свет представляет собой оптический сигнал, достигающий входного конца волокна. Рассеяние назад складывается из эффектов Релеевского рассеяния и отражения Френеля. В качественном волокне рассеянный свет распределяется случайным образом. Френелевское отражение возникает из-за скачков показателя преломления на соединителях и концах волокна. Часть света, рассеянного и отраженного назад, достигает входного конца волокна, составляет отраженный назад сигнал.

На экране дисплея оптического рефлектометра показывается вертикальная развертка сигнала в зависимости от его мощности и горизонтальная временная развертка. Затухание в волокне определяется кривой амплитуды сигнала, спадающей слева (от входного конца волокна). Оба сигнала, входной и рассеянный назад, затухают с расстоянием, при этом сигнал с временем уменьшается. Соединитель или кольцевой скол волокна, равно как любое несовершенство волокна, проявляются в виде увеличения амплитуды сигнала на дисплее, при этом вклад эффекта Френелевского отражения в рассеянный назад сигнал значительнее по сравнению с вкладом Релеевского рассеяния. Качество выполненного соединения может быть оценено по амплитуде рассеянного назад сигнала: большее расстояние означает более высокие потери на соединении. Включение соединителя обуславливают как проявление некоторого дополнительного рассеянного сигнала, так и спад мощности из-за дополнительных потерь. Величина вносимых соединителем потерь определяет его качество.

Большинство оптических рефлектометров используют курсор для обозначения места нахождения особых точек на линии, и показывает на дисплее расстояние до них как в терминах времени, так и физической длины. Например, можно измерить расстояние до соединителя с точностью до 50см.

Величина диапазона длин, для которого пригодно использование оптического рефлектометра зависит от двух характеристик. Во-первых, от динамического диапазона, который определяется минимальным и максимальным значениями оптической мощности, воспринимаемой детектором. Кроме того, определенную роль играют затухание волны и потери на соединителях. Динамический диапазон оптического рефлектометра и потери внутри волоконной системы определяют максимальную длину оптического кабеля, которая еще может быть проверена на основе анализа улавливания управления рассеянного назад сигнала.

Оптический рефлектометр дает пользователю много информации и позволяет детально исследовать некоторые ее элементы.

На рисунке 4.4 в качестве примера представлен образец рефлектограммы ОВ. Импульс в точке 0 соответствует локальному Френелевскому отражению от стыка входного торца общего канала ответвителя и входного торца тестируемого ОВ, точка 1 соответствует месту соединения волокон (например, при сращивании строительных длин). Наличие импульса и заметного скачка свидетельствует о плохом качестве соединения. Выброс 3 может свидетельствовать о наличии локальной неоднородности типа микротрещины, точка 4 – френелевскому отражению от выходного торца ОВ.



Рисунок 4.4 – Рефлектограмма ОВ

**5 . Расчет параметров регенерационного участка**

* 1. **Определение длины участка по затуханию и дисперсии**

При проектировании высокоскоростных ВОСП должны рассчитываться отдельно длина участка регенерации по затуханию (*La*) и длина участка регенерации по широкополосности (*Lш*), т.к. причины, ограничивающие предельные значения *La* и *Lш* независимы.

В общем случае необходимо рассчитывать две величины длины участка регенерации по затуханию:

*La max* - максимальная проектная длина участка регенерации;

*La min* - минимальная проектная длина участка регенерации.

Для оценки величины длин участка регенерации могут быть использованы следующие выражения:

 (5.1)

 (5.2)

 (5.3)

где *Аmax, А*min (дБ) - максимальное и минимальное значения перекрываемого затухания аппаратуры ВОСП, обеспечивающее к концу срока службы значение коэффициента ошибок не более 1\*10-10;
*αок*=0,22 дБ/км - километрическое затухание в оптических волокнах кабеля;
*αнс*=0,05 дБ - среднее значение затухания мощности оптического излучения неразъемного оптического соединителя на стыке между строительными длинами кабеля на участке регенерации;
*Lстр*=4 км - среднее значение строительной длины кабеля на участке регенерации;
*αрс*=0,5 дБ - затухание мощности оптического излучения разъемного оптического соединителя;
n - число разъемных оптических соединителей на участке регенерации;
*D*=3 пс/нм.км - суммарная дисперсия одномодового оптического волокна;
d=0,09 нм - ширина спектра источника излучения;
*B*=9953 МГц - широкополосность цифровых сигналов, передаваемых по оптическому тракту;
*М*=6 дБ - системный запас ВОСП по кабелю на участке регенерации.

Если по результатам расчетов получено: *Lш* < *La max* , то для проектирования должны быть выбраны аппаратура или кабель с другими техническими данными (D,d), обеспечивающие больший запас по широкополосности на участке регенерации. Расчет должен быть произведен снова. Критерием окончательного выбора аппаратуры или кабеля должно быть выполнение соотношения:

*Lш* > *La max* , (5.4)

с учетом требуемой пропускной способности трафика (*В*) на перспективу развития.

Максимальное значение перекрываемого затухания (*Amax*) определяется как разность между минимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и уровнем чувствительности приемника для ВОСП.

Минимальное значение перекрываемого затухания (*Аmin*) определяется как разность между максимальным уровнем мощности оптического излучения на передаче и уровнем перегрузки приемника для ВОСП.

Уровни чувствительности и перегрузки приемника определяются соответственно как минимальное и максимальное значения уровня мощности оптического излучения на входе приемника, при которых обеспечивается коэффициент ошибок не более 1\*10-10 к концу срока службы аппаратуры.

 Уровни мощности оптического излучения на передаче, ширина спектра источника излучения (d), затухание мощности оптического излучения разъемного оптического соединителя (*αрc*), уровни чувствительности и перегрузки приемника должны быть приведены в технических характеристиках на аппаратуру и для ВОСП СЦИ должны удовлетворять требованиям ОСТ.45.104-97.

 Параметры оптических волокон и кабелей в выражениях (5.1), (5.2) и (5.3) приведены в технических характеристиках на поставляемый оптический кабель (*αок*, *D*) или определяяются условиями и технологией прокладки (*αнc, Lстр*).

 Системный запас (*М*) учитывает изменение состава оптического кабеля за счет появления дополнительных (ремонтных) вставок, сварных соединений, a 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, исходя из статистики повреждения (обрывов) кабеля в зоне действия оператора.

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

Найдем энергетический потенциал аппаратуры (*Амакс*) – максимальное затухание участка без учета передающего и приемного стыков аппаратуры:

*Амакс = Рпер - Рпр*, (5.5)

где Рпер – уровень передачи;

Рпр – уровень приема минимальный с предусилителем;

*Амакс = Рпер - Рпр = 2 - ( - 42) = 44 дБ;*

Найдем энергетический потенциал аппаратуры (Амин) – минимальное затухание участка:

*Амин = Рист – П,* (5.6)

где П – уровень перегрузки приемника (-1 дБ);

Рист – передающий уровень источника излучения, *Рист* = 2 дБ.

*Амин  = 2 – (-1) = 3* дБ

Подставляя найденные значения в формулы (5.1), (5.2), (5.3), получаем

км,

км,

км.

По результатам расчетов получено, что Lш > La max , значит, аппаратура и кабель выбраны с техническими данными, обеспечивающими запас по широкополосности на участке регенерации.

**5.2** **Расчет дисперсии**

При передаче сигналов по ВОЛС используются методы ИКМ, в результате чего передаваемая информация представляется в виде двоичных кодов - битов 1 и 0, причем 1 соответствует высокому уровню мощности, а 0 - низкому. Модулированный сигнал передается по ОВ импульсами с длительностью  и скоростью передачи  бит/с. В процессе распространения вследствие дисперсии происходит «размывание» импульсов, т.е. увеличение их длительности.

Если длительность  полученных приемником импульсов превысит битовый интервал, то произойдет наложение соседних импульсов друг на друга, что вызовет межсимвольную интерференцию. Следовательно, приемник не сможет распознать отдельные импульсы, и в результате этого увеличится коэффициент битовых ошибок BER. Битовый интервал  связан со скоростью передачи сигналов соотношением:

. (5.7)

Таким образом, для нормального функционирования ВОЛС необходимо:

- обеспечить длительность полученного импульса , не превышающую исходный битовый интервал;

-обеспечить полученную мощность равную чувствительности приемника *Рпр* или ввести запас, превышающий *Рпр*.;

Вот почему при проектировании ВОЛС с большей скоростью передачи важнейшими техническими характеристиками являются дисперсия и затухание ОВ.

5.2.1 Расчет поляризационной модовой дисперсии

Если линия состоит из *N* сегментов ВОК, дисперсия в каждом из которых равна, то результирующая поляризационная модовая дисперсия определяется из выражения в соответствии с законом суммы независимых случайных величин:

, (5.8)

Поляризационная модовая дисперсия , пс для каждого участка рассчитывается из выражения (5.9):

,пс (5.9)

 пс,

 пс,

 пс.

Уширение импульса за счет хроматической дисперсии определяется из выражения(5.10):

, пс (5.10)

 пс,

 пс,

 пс.

С учетом поляризационной модовой дисперсией результирующая дисперсия будет определяться из следующего выражения [8]:

 ,пс (5.11)

 пс,

 пс,

 пс.

Т.к. битовый интервал  получим:

для STM-64: пс.

Максимально допустимая величина уширения импульсов определяется из условия, что допустимая длительность импульса:

. (5.12)

Следовательно, при скорости передачи 9953,28 Мбит/с допустимая длительность импульса будет  пс. Начальная длительность импульсов определяется из выражения [9]:

. (5.13)

Конечная длительность импульса выражается через его начальную длительность  соотношением

. (5.14)

Тогда длительность импульса, увеличенная за счет дисперсии на первом участке, будет равна:

 пс

 Т.е. при скорости передачи 9953,08 Мбит/с (STM-64), оптический импульс, уширенный вследствие дисперсии, не превысит допустимую величину =50,25 пс. Но т.к. по линии проходит транзитный трафик недопустимо ухудшение качества сигнала, поэтому, чтобы по ВОК передавать сигналы STM-64, необходимо компенсировать хроматическую дисперсию в каждом пункте.

Для компенсации дисперсии выберем модуль DCM-10 и DCM-20 с вносимым затуханием 3,7; 4,1 дБ и полной дисперсией (-170); (-340) пс/нм соответственно.

Полная отрицательная дисперсия модулей компенсации:

 пс,

 пс.

Следовательно, полная скомпенсированная дисперсия на каждом участке линии связи будет:

,пс (5.15)

 пс,

 пс,

 пс.

В результате, конечная длительность импульса на выходе оптического кабеля на каждом участке при скорости передачи = 9953,28 Мбит/с (STM-64) будет:

, пс (5.16)

 пс,

 пс,

 пс.

Этот результат довольно меньше допустимого значения, значит качество сигнала почти не ухудшилось.

5.3 **Расчет стрелы провеса кабеля**

Расчет стрелы провеса оптического кабеля производится по методике [10] с целью определения максимально-допустимого напряжения растяжения. При расчете самонесущего оптического кабеля, подвешенного на опорах контактной сети, на механическую прочность необходимо учитывать собственный вес кабеля, а также дополнительные нагрузки за счет образования льда и ветрового давления на ОК. Для удобства проведения расчетов воздушных конструкций на механическую прочность принято выражать все нагрузки, действующие в них, через так называемые удельные нагрузки.

Удельная нагрузка от силы тяжести (собственного веса) оптического кабеля , Н/м3 находится по формуле (6.1):

, (5.17)

где *P* - удельная масса оптического кабеля, *Р*=0,11 кг/м;
*S* - площадь поперечного сечения кабеля, *S*=1,13.10-4 м2;
*g* - ускорение свободного падения, *g*= 9,81 м/с2.

 Н/м3

Удельная нагрузка от наличия на воздушных конструкциях льда , Н/м3 определяется по формуле (6.2):

, (5.18)

где *b* - толщина стенки льда на кабеле, *b*=5.10-3 м;

 - плотность льда, = 900 кг/м3;
*d* - наружный диаметр оптического кабеля, *d*=1,2.10-4 м.

 Н/м3

Удельная нагрузка от силы тяжести оптического кабеля и силы тяжести отложившегося на нем льда  ,Н/м3 вычисляется по формуле (6.3):

, (5.19)

 Н/м3.

Удельная нагрузка от давления ветра на воздушные конструкции при отсутствии льда , Н/м3 определяется по формуле (6.4):

, (5.20)

где  - скорость ветра, =20 м/с;

 Н/м.

Удельная нагрузка от давления ветра на оптический кабель, покрытый льдом , Н/м3 выражается по формуле (6.5):

, (5.21)

где  - скорость ветра, =30 м/с.

 Н/м3.

Удельная нагрузка от силы тяжести оптического кабеля и давления ветра при отсутствии льда , Н/м3 определится по формуле (6.6):

, (5.22)

 Н/м3.

Удельную нагрузку от силы тяжести оптического кабеля, льда и давления ветра на воздушные конструкции, покрытые льдом , Н/м3 найдем по формуле(6.7):

, (5.23)

Н/м3.

Напряжение растяжения в оптическом кабеле , МПа определим по формуле (6.8):

, (5.24)

где *l*- длина пролета, *l*=50 м;

 - суммарная удельная нагрузка , МН/м3;
*f* - стрела провеса оптического кабеля в пролете, *f*=1,2 м.

 МПа

Вычислим допустимое напряжение растяжения выбранного кабеля , МПа по формуле (6.9):

, (5.25)

где F – стойкость к продольному растяжению кабеля, F=4 кН;

 МПа.

Сравним рассчитанную величину напряжения растяжения с допустимой величиной для выбранного оптического кабеля:

28<35,4

Неравенство выполняется - значит стрела провеса выбрана верно и стойкость кабеля к продольному растяжению соответствует рассчитанным параметрам.

**6. Мероприятия по БЖД.**

**6.1 Защита от электростатического разряда (ESD).**

Оборудования OptiX BWS 1600G требует определенной защиты от электростатического разряда для обеспечения надежной работы. Необходимо наличие хорошей системы заземления. При использовании антистатического пола или настилке полупроводящего покрытия, для заземления следует прокладывать в различных местах пола медную фольгу, которую размещают между бетонным перекрытием и полупроводящим полом и надежно соединяют с линией заземления.

Пыль может серьёзно повредить оптическое оборудование синхронной передачи. Проникновение пылевых и иных частиц в помещение аппаратной может привести к ухудшению контакта в разъёмах или на металлических клеммах. При повышенной влажности в аппаратной пыль может вызвать токи утечки. Как показывает опыт обслуживающего персонала, скопившаяся пыль часто становится причиной аварий оборудования. При очень низкой влажности в помещении повышается вероятность накопления статического электричества.

Необходимо поддерживать соответствующую температуру и влажность в помещении. Слишком высокая влажность может вызвать коррозию металлических деталей оборудования, слишком низкая - накопление статического электричества.

Все работы, в ходе которых приходится прикасаться к печатным платам, необходимо выполнять с надетым антистатическим браслетом и в соответствующей рабочей одежде, во избежание повреждения оборудования статическими зарядами.

Возможно нежелательное наведение высокочастотных помех электросети из первичной обмотки трансформатора источника питания на вторичную обмотку через распределённые ёмкости. Для предотвращения такой аварийной ситуации, помимо использования соответствующего трансформатора, на вводе линии питания необходимо установить низкочастотный фильтр.

Основой устранения помех от системы заземления является недопущение образования шлейфов между различными устройствами заземления, например сигнального заземления (аналоговых и цифровых сигналов), заземления питания, защитного и экранирующего заземления, а также шлейфов, создаваемых большими распределёнными емкостями. В противном случае на работу оборудования будут влиять помехи общего импеданса системы заземления. В невысоких зданиях система рабочего заземления оборудования OptiX BWS 1600G должна быть изолирована от устройств заземления электрооборудования и грозозащиты и размещена от них как можно дальше.

В каждой небольшой аппаратной должно находиться определённое количество компактных огнетушителей для ликвидации начальных очагов возгорания. В больших аппаратных должны быть установлены стационарные системы пожаротушения. Помещение аппаратной должно быть оборудовано системой автоматической пожарной сигнализации. Все телекоммуникационные сооружения с системами пожарной сигнализации должны иметь системы аварийного освещения и указатели направлений эвакуации на нужных местах, проходах и дверях.

**4.2 Охрана труда и техника безопасности**

К самостоятельной работе по эксплуатации оборудования и измерительных приборов, содержащих лазерный генератор, допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний и имеющие профессиональную квалификацию.

Для обеспечения безопасности персонала, обслуживающего технологическое оборудование, выполняются следующие мероприятия, предусмотренные в:

- размещение проектируемого оборудования в технических помещениях с соблюдением нормируемых проходов;

- заземление металлических корпусов аппаратуры, электрооборудования, металлических частей кросса и других металлических конструкций в помещении, где устанавливается проектируемое оборудование;

- естественное и искусственное освещение используемых производственных и подсобных помещений;

- защита помещений от пыли, позволяющая поддерживать запыленность воздуха в норме;

- для предотвращения распространения пожара из помещения в помещение свободное пространство, оставшееся после прокладки кабелей и проводов в проемах или трубах между помещениями, в том числе и между этажами, заполняется легкоудаляемыми негорючими материалами (минеральной ватой, стекловатой и др.).

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала необходимо:

- применение комплекса защитных средств: диэлектрических ковриков, перчаток, предупреждающих надписей и плакатов для защиты от поражения электрическим током;

- использование для проведения ремонтных и профилактических работ пониженного напряжения 36В для переносных ламп и ручного инструмента;

- применение стремянок для обслуживания оборудования на высоте.

злучение мониторов, используемых для организации рабочих мест обслуживающего персонала, должно соответствовать санитарным нормам [14].

Для монтажа и измерений ОВ используется специальная передвижная лаборатория, оборудованная на базе автомашины. В автомашине расположен комплект для сварки волокон, набор инструмента, небольшой запас растворителя нефрас 50/170 в металлической емкости. Запрещается пользоваться устройствами для сварки волоконно-оптических кабелей, не имеющих паспорта на прибор, инструкции на эксплуатацию и сертификата безопасности.

До начала работ должен проводиться соответствующий инструктаж по технике безопасности.

Запрещается непосредственный визуальный осмотр оптического порта передачи на плате оптических интерфейсов, в особенности это относится к блоку оптического усилителя (OAU). Усилители имеют высокую выходную оптическую мощность, и невидимое инфракрасное излучение может повредить зрение.

Во избежание повреждения оптических портов неиспользуемые оптические интерфейсы должны быть закрыты пыленепроницаемыми колпачками. Они обеспечивают защиту глаз при осмотре интерфейса. Эти колпачки также не допускают попадания пыли в оптические интерфейсы.

При установке аппаратного шлейфа между передатчиком и приемником должен быть подключен оптический аттенюатор. В противном случае может быть поврежден модуль оптического приемника (при слишком высокой оптической мощности приема).

Для очистки волоконно-оптических соединителей и оптических портов на платах следует пользоваться чистой хлопчатобумажной тканью.

Во избежание повреждения компонентов при техобслуживании оборудования следует принимать меры по защите от статического электричества. Во всех случаях, когда необходимо дотронуться до платы, должен быть надет антистатический браслет. Кроме того, следует обеспечить надежное заземление антистатического браслета. Извлеченные неиспользуемые платы следует хранить в антистатической упаковке.

Прежде чем установить/извлечь плату, отсоединить все волоконно-оптические кабели от этой платы. Устанавливать/извлекать плату с присоединенными волоконно-оптическими кабелями запрещается.

Произвольная замена плат блока оптического ретранслятора (OTU) не разрешается, поскольку каждой из плат соответствует собственная длина волны выходного оптического сигнала. Поэтому при замене платы в блоке OTU должна использоваться плата с той же длиной волны. Существуют различные типы плат мультиплексора/ демультиплексора, оптического усилителя, FIU и ITL, соответствующие различным рабочим полосам пропускания. При замене следует устанавливать однотипную плату.

При хранении запасных плат следует учитывать такие факторы, как температура и влажность воздуха. В общем случае в антистатическую защитную упаковку должен быть помещен влагопоглотитель, обеспечивающий осушение воздушной среды внутри упаковки. В том случае, когда плата переносится из среды с низкой влажностью и низкой температурой в среду с повышенной влажностью и повышенной температурой, плату следует выдержать без упаковки не менее чем 30 минут. В противном случае на поверхности платы образуется конденсат, что может привести к повреждению платы.

Не рекомендуется закрывать систему NM во время обычной эксплуатации. Закрытие системы NM не приводит к прерыванию сетевого трафика, однако в то время, когда эта система не работает, мониторинг рабочих характеристик сети невозможен.

Категорически запрещены компьютерные игры и инсталляция постороннего программного обеспечения. Следует периодически выполнять антивирусную проверку с помощью соответствующих программных средств для предотвращения заражения системы NM компьютерными вирусами.

Отсоединение или присоединение кабелей питания при включенном питании (в состоянии ON) запрещено. При соприкосновении токоведущих элементов кабеля питания с проводниками возможно появление электрической искры или дуги. Это может привести к пожару, травме глаз или к более тяжким последствиям. Поэтому прежде чем отсоединить или присоединить любой кабель питания, нужно убедиться в том, что выключатель питания находится в положении «выключено». Кроме того, перед присоединением кабеля убеждаемся в том, что кабель и маркировка кабеля соответствуют указаниям в инструкции по установке.

Прокладка кабелей питания рядом с сигнальными кабелями не допускается.

**4.3. Безопасность проекта**

**4.3.1 Электробезопасность**

При прохождении через тело человека ток оказывает вредоносное термическое, биологическое и электролитическое действия.

Основные причины поражения электрическим током:

1. случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением;

2. появление напряжения на металлических конструктивных частях электрооборудования;

3. появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения;

4. возникновение шагового напряжения на поверхности земли в результате замыкания провода на землю.

Для защиты от поражения электрическим током при повреждении изоляции должны выполнятся следующие защитные меры:

заземление;

зануление;

защитное отключение;

выравнивание потенциала;

система защитных проводов;

изоляция нетоковедущих частей;

электрическое разделение сети;

малое напряжение;

контроль изоляции;

компенсация токов замыкания на землю.

навигатор

Защитное заземление должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

Защитное заземление следует выполнять преднамеренным электрическим соединением металлических частей электроустановок с землей или ее эквивалентом. В качестве заземляющих устройств в первую очередь должны быть использованы естественные заземлители. Допустимые напряжения прикосновения и сопротивления заземляющих устройств должны быть обеспечены в любое время года. В качестве заземляющих проводников следует использовать специально предназначенные для этой цели проводники, а также металлические строительные, производственные и электромонтажные конструкции. Материал, конструкция и размеры заземлителей и заземляющих проводников должны обеспечивать устойчивость к механическим, химическим, и термическим воздействиям на весь период эксплуатации.

При использовании железобетонных фундаментов промышленных зданий и сооружений в качестве естественных заземлителей и обеспечении допустимых напряжений прикосновения не требуется сооружение искусственных заземлителей, прокладка выравнивающих полос снаружи зданий и выполнение магистральных проводников заземления внутри здания

Оборудование (ПЭВМ) в данном помещении относится к I классу по способу защиты от поражения электрическим током. Питание ПЭВМ в помещении осуществляется через сеть частотой 50 Гц, напряжением 220 В. Компьютер подключается к источнику питания с помощью трехжильного провода, в котором одна жила служит для заземления. Согласно [19], сопротивление заземляющего устройства для данного типа сети в помещении не должно превышать 4 Ом, что отвечает требованиям для электрооборудования с напряжением до 1000 В, сопротивление изоляции токоведущих проводов должно быть не менее 0,5 МОм. В данном помещении заземление произведено, сопротивление заземляющего устройства составляет 3,3 Ом, что соответствует требованиям [19]. Контроль защитного заземления производится ежегодно.

**4.3.2 Микроклимат на рабочем месте**

Наиболее значительным фактором, который чаще всего реально влияет на производительность и безопасность труда, является микроклимат рабочего места, который характеризуется уровнем температуры и влажности воздуха, скоростью его движения. Эти параметры должны соответствовать требованиям [16], приведенным в таблице 12.1.

Таблица 12.1 - Требования к параметрам микроклимата в производственном помещении.

|  |  |
| --- | --- |
| ПараметрыМикроклимата | Значения параметров |
| Летом | Зимой |
| Температура,  | 23-25 | 22-24 |
| Скорость воздушных масс, м/с | 0.1-0.2 | 0.1 |
| Относительная влажность, % | 40-60 | 40-60 |

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температу­ры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (таблица 12.2).

Объем помещений, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5м3/человека с учетом максимального числа одновременно работающих в смену.

Таблица 12.2 -Параметры микроклимата помещений с установленными компьютерами.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Период года | Параметр микроклимата | Величина |
| Холодный | Температура воздуха в помещении Относительная влажностьСкорость движения воздуха | 22…24°С40…60%до 0,1м/с |
| Теплый | Температура воздуха в помещении Относительная влажностьСкорость движения воздуха | 23…25°С40…60%0,1…0,2м/с |

Высокая температура воздуха, особенно в сочетании с высокой влажностью, резко снижает работоспособность оператора. При этом человек быстро утомляется, у него понижается внимание, уменьшается скорость сенсомоторных реакций, нарушается координация движений, увеличивается количество ошибок.

Офис имеет площадь пола 30 м2, на одного работающего приходится 8 м2, что соответствует требованиям [26].

Средняя температура воздуха в помещении составляет +22 °С, относительная влажность - 46%, атмосферное давление - 750 мм.pт.ст., содержание пыли - не более 10 мг/м воздуха рабочего места, максимальные размеры частиц - 2 мкм.

Помещение лаборатории не оборудовано системами кондиционирования или вентиляции, воздухообмен в нем обеспечивается путем естественного проветривания помещения (открытие окон) на основании субъективных ощущений персонала. Вследствие этого температура в помещении неравномерно колеблется в пределах от 20 до 25°С, влажность – от 30 до 80%.

**4.3.3 Освещенность рабочего места**

Расчет естественной освещенности

Расчет площади световых проемов производится по формуле:

 (12.1)

где S0- рассчитываемая площадь световых проемов при боковом освещении;

eH=0,9- нормированное значение КЕО;

KЗ=1,2- коэффициент запаса;

=11- световая характеристика окна;

KЗД=1- коэффициент затемнения противостоящими зданиями;

SП=15 м2- площадь пола;

=0.422- общий коэффициент пропускания;

r1=2 коэффициент, учитывающий повышение КЕО благодаря отраженному свету.

Коэффициенты eH, KЗ, , r1 определены по таблицам.

Получили минимальную площадь световых проемов S0=3,12 м2. Площадь светового проема в помещении 4 м2, что достаточно для работы при естественном освещении.

Расчет искусственной освещенности рабочего места

Искусственное освещение в помещениях эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного или комбинированного освещения согласно.

Искусственное освещение в данном помещении осуществляется с помощью 6 ламп мощностью 40 Вт каждая, расположенных равномерно в верхней зоне помещения.

Исходя из требуемого значения искусственной освещенности Ен = 300лк, будем проводить расчет искусственного освещения. Методом светового потока число светильников определятся по формуле:

 (12.2)

где n = 6 шт. – число светильников;

Фл = 3120 лм– световой поток источника света (светильника);

Ао.с. = 15 м2– освещаемая площадь;

Z = 1,1– коэффициент неравномерности распределения освещенности;

Кз = 1,5 – коэффициент запаса;

u = 0,5 – коэффициент использования светового потока.

Из этой формулы определяем значение существующей искусственной освещенности:

 (12.3)

Реальное значение Ен = 378 лк при наличии 6 светильников. Полученное значение Ен допустимо, оно не превышает требуемую искусственную освещенность помещения.

**Заключение**

В данном дипломном проекте был произведен расчет внедрения технологии спектрального уплотнения. В процессе проектирования были приняты следующие шаги и решения:

1) Произведен расчет пропускной способности системы, которая составляет 70 Гбит/с;

2) Выбран кабель ДПТ – 024 Н 06 – 04 и его поставщик ЗАО «Севкабель-Оптик»;

3) Выбрана система передачи производства Huawei Technologies, OptiX BWS 1600G

4) Для компенсации уширения импульсов установить на линии модули компенсации дисперсии DCM-10 и DCM-20;

5) Рассчитана стрела провеса кабеля и подтверждено соответствие технических характеристик кабеля требуемым параметрам;

6) Рассчитаны параметры надежности системы, в частности коэффициент готовности системы, который оказался довольно высоким Кг=0,9999999995;

7) Рассчитана экономическая эффективность инвестиций, из чего видно что проект является рентабельным.

**Список литературы.**

1. Научно-технический журнал № 4/2004 , “Lightwave russian edition”
2. Лапина Н.Ф. Интегральные и оптические сети. Учебное пособие и методические указания к дипломному и курсовому проектированию.- Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2005.-68.
3. Техническая документация магистральная оптическая система передачи DWDM OptiX BWS 1600G
4. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз. 1998.- 300 с.
5. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетех связи. – М.: Радио и связь, 2000. -468 с.
6. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. /Перевод с английского под редакцией Слепова Н.Н. – М.: Техносфера. 2003.
7. Крухмалев В.В., Адамович Л.В., Лепнина Е.Н. Основы проектирования цифровых систем передачи: Учебное пособие к выполнению курсовых и дипломных работ. – Самара ПГАТИ, 1999 – 110 с.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
9. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. – Вэлком, 2002.
10. Савин Е.З. Волоконно-оптическая линия связи на участке железной дороги. Методические указания к курсовому проектированию. Хабаровск, МПС РФ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2001. – 52 с.
11. Сачков Н.Г., Русакова Е. А., Паршин А. В. Основы эксплуатационного обслуживания информационных систем железнодорожного транспорта./ под редакцией Н.Г. Сачкова: Учебное пособие для ВУЗов ж.-д. транспорта – М.: Маршрут, 2005.-416 с.
12. Копылов Е.А., Москалёв А.Н., Шилков В.И. Организационно-экономическое обоснование дипломных проектов: Методические указания к выполнению обоснования инвестиций в дипломном проекте. / авт.-сост. Копылов Е.А., Москалёв А.Н., Шилков В.И.. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 127 с.
13. Методические указания по определению критерия уровня готовности к информационному обществу. Екатеринбург, 2004.
14. СанПиН2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
15. СанПиН 2.2.4.548-96/03. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.