Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 08.09.2024 23:36:47
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ О.Г. Локтионова
«28» 08 _____ 2024 г.

СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ И РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЧИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Информационные технологии и системы связи» направленность «Проектирование систем связи малых космических аппаратов» по дисциплине «Проектирование оптических систем доступа»

Курск 2024

УДК 004.716

Составители: А. А. Гуламов

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Зав. кафедры КПиСС *В.Г. Андронов*

Схема организации связи и расчёт характеристик передачи: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов направления подготовки 11.04.02 направленность «Проектирование систем связи малых космических аппаратов» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Гуламов. - Курск, 2024. – 33 с.:, табл. 8. – Библиогр.: с. 28.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат теоретические сведения: о методике расчёта характеристик предачи волоконно-оптических линий связи; выборе оборудования и интерфейсов для построения сети доступа, предназначенной для предоставления конкретных видов услуг связи, а также задания для выполнения работы и перечень вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Информационные технологии и системы связи» направленность «Проектирование систем связи малых космических аппаратов» по дисциплине «Проектирование оптических систем доступа».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Информационные технологии и системы связи» направленность «Проектирование систем связи малых космических аппаратов»по дисциплине «Проектирование оптических систем доступа».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.08.24 Формат 60x841/16.
Усл. печ. л.1,92. Уч.-изд. л.1,73. Тираж 100 экз. Заказ. 805. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Содержание

Инструкция по технике безопасности - 4
1. Цель работы - 9
2. Краткие теоретические сведения - 9
3. Расчёт характеристик передачи волоконно-оптических линий- 10
4.Задание - 27
5. Контрольные вопросы - 28
Библиографический список - 28
Заключение - 29
Приложение А Форма титульного листа отчета обучающегося о выполняемой лабораторной работе - 33

ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Общие положения

Настоящая инструкция предназначена для студентов и работников, выполняющих работы на персональном компьютере и на сетевом оборудовании (коммутаторы, маршрутизаторы, межсетевые экраны и т.д.).

К выполнению работ допускаются лица:

- не моложе 16 лет;
- прошедшие медицинский осмотр;
- прошедшие вводный инструктаж по охране труда, а также инструктаж по охране труда на рабочем месте;
- прошедшие обучение безопасным приемам труда на рабочем месте по выполняемой работе.

Работник обязан:

- выполнять правила внутреннего трудового распорядка, установленные в положениях и инструкциях, утвержденных ректором ЮЗГУ, или его заместителями;
- выполнять требования настоящей инструкции;
- сообщать руководителю работ о неисправностях, при которых невозможно безопасное производство работ;
- не допускать присутствия на рабочем месте посторонних лиц;
- уметь оказывать первую помощь и при необходимости оказывать ее пострадавшим при несчастных случаях на производстве, по возможности сохранив обстановку на месте происшествия без изменения и сообщив о случившемся руководителю;
- выполнять требования противопожарной безопасности не разводить открытый огонь без специального на то разрешения руководителя работ;
- периодически проходить медицинский осмотр в сроки, предусмотренные для данной профессии.

Работник должен знать опасные и вредные производственные факторы, присутствующие на данном рабочем месте:

- возможность травмирования электрическим током при отсутствии или неисправности заземляющих устройств;

- вредное воздействие монитора компьютера при его неправильной установке или неисправности;

- возможность возникновения заболеваний при неправильном расположении монитора, клавиатуры, стула и стола;

- вредное воздействие паров, газов и аэрозолей, выделяющихся при работе копировальной и печатающей оргтехники в непроветриваемых помещениях.

Работник при выполнении любой работы должен обладать здоровым чувством опасности и руководствоваться здравым смыслом. При отсутствии данных качеств он к самостоятельной работе не допускается.

Требования охраны труда перед началом работы

Перед началом работы работник обязан:

- получить от руководителя работ инструктаж о безопасных методах, приемах и последовательности выполнения производственного задания;

- привести в порядок одежду, застегнуть на все пуговицы, чтобы не было свисающих концов, уложить волосы, чтобы они не закрывали лицо и глаза;

- привести рабочее место в безопасное состояние;

- запрещается носить обувь на чрезмерно высоких каблуках;

Перед включением компьютера или сетевого оборудования убедиться в исправности электрических проводов, штепсельных вилок и розеток. Вилки и розетки должны соответствовать Евростандарту. Отличительной особенностью этих вилок и розеток является наличие третьего провода, обеспечивающего заземление компьютера или другого прибора. При отсутствии третьего заземляющего провода заземление должно быть выполнено обычным способом с применением заземляющего проводника и контура заземления;

Убедиться, что корпус включаемого оборудования не поврежден, что на нем не находятся предметы, бумага и т.п. Вентиляционные отверстия в корпусе включаемого оборудования не должны быть закрыты занавесками, завалены бумагой, заклеены липкой лентой или перекрыты каким-либо другим способом.

Требования охраны труда во время работы

Запрещается во время работы пить какие-либо напитки, принимать пищу;

Запрещается ставить на рабочий стол любые жидкости в любой таре (упаковке или в чашках);

Помещения для эксплуатации компьютеров, сетевого оборудования должны иметь естественное и искусственное освещение, естественную вентиляцию и соответствовать требованиям действующих норм и правил. Запрещается размещать рабочие места вблизи силовых электрических кабелей и вводов трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе и отрицательно влияющие на здоровье операторов;

Окна в помещениях, где установлены компьютеры должны быть ориентированы на север и северо-восток. Оконные проемы оборудуются регулируемыми устройствами типа жалюзи или занавесками;

Площадь на одно рабочее место пользователей компьютера должна составлять не менее 6 $м^2$ при рядном и центральном расположении, при расположении по периметру помещения – 4 $м^2$. При использовании компьютера без вспомогательных устройств (принтер, сканер и т.п.) с продолжительностью работы менее четырех часов в день допускается минимальная площадь на одно рабочее место 5 $м^2$;

Полимерные материалы, используемые для внутренней отделки интерьера помещений с ПК, должны подвергаться санитарно-эпидемиологической экспертизе. Поверхность пола должна обладать антистатическими свойствами, быть ровной. В помещениях ежедневно проводится влажная уборка. Запрещается использование удлинителей, фильтров, тройников и т.п., не имеющих специальных заземляющих контактов;

Экран видеомонитора должен находится от глаз оператора на расстоянии 600-700 мм, минимально допустимое расстояние 500 мм;

Продолжительность непрерывной работы с ПК должна быть не более 2 часов.

Требования охраны труда по окончании работы

По окончании работы работник обязан выполнить следующее:

- привести в порядок рабочее место;
- убрать инструмент и приспособления в специально отведенные для него места хранения;
- обо всех замеченных неисправностях и отклонениях от нормального состояния сообщить руководителю работ;
- привести рабочее место в соответствие с требованиями пожарной безопасности.

Действие при аварии, пожаре, травме

В случае возникновения аварии или ситуации, в которой возможно возникновение аварии немедленно прекратить работу, предпринять меры к собственной безопасности и безопасности других рабочих, сообщить о случившемся руководителю работ.

В случае возникновения пожара немедленно прекратить работу, сообщить в пожарную часть по телефону 01, своему руководителю работ и приступить к тушению огня имеющимися средствами.

В случае получения травмы обратиться в медпункт, сохранить по возможности место травмирования в том состоянии, в котором оно было на момент травмирования, доложить своему руководителю работ лично или через товарищей по работе.

Ответственность за нарушение инструкции

Каждый работник ЮЗГУ в зависимости от тяжести последствий несет дисциплинарную, административную или уголовную ответственность за несоблюдение настоящей инструкции, а также прочих положений и инструкций, утвержденных ректором ЮЗГУ или его заместителями.

Руководители подразделений, заведующий кафедрой, начальники отделов и служб несут ответственность за действия своих подчиненных, которые привели или могли привести к авариям и травмам согласно действующему в РФ законодательству в зависи-

мости от тяжести последствий в дисциплинарном, административном или уголовном порядке.

Администрация ЮЗГУ вправе взыскать с виновных убытки, понесенные предприятием в результате ликвидации аварии, при возмещении ущерба работникам по временной или постоянной утрате трудоспособности в соответствии с действующим законодательством.

1 Цель работы

Изучение технических требований по оборудованию и интерфейсам сетей доступа.

Освоение методики расчёта характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.

2 Краткие теоретические сведения

Актуальной проблемой развития телекоммуникаций на основе новых технологий стала проблема проектирования и расчета СД.

Среди технологий для сетей доступа необходимо произвести выбор, руководствуясь многими позициями, но с учётом приоритетов потребителей ресурсов СД. К таким приоритетам относятся: спектр телекоммуникационных услуг (прежде всего широкополосных); стоимость услуг; возможности их простого добавления или исключения; максимальная информированность потребителя по всем проблемам получения услуг; надёжность функционирования сети; скрытность информации пользователя от несанкционированного считывания и т.д.

Как показывает уже существующий довольно большой опыт создания и использования сетей доступа, наиболее приемлемые решения достигаются выбором технологий GEPON, т.с. пассивная оптическая сеть с графиком пакетов Ethernet. Это обусловлено широким проникновением персональных компьютеров во многие сферы деятельности людей, начиная от профессиональной деятельности, учёбы и заканчивая развлечениями. Также решающим здесь является технико-экономическая целесообразность, т.с. относительно других технологий низкая стоимость и возможности, но совмещению с существующими сетями коммутации каналов через потоки E1, с сетями кабельного телевидения при трансляции всего пакета программ в режиме широкого вещания на отдельной оптической частоте 1550нм, экономичность с точки зрения потребляемой электроэнергии, малые габариты изделий. При этом достаточно просто пользователю доставляется любой трафик, т.с. и узкополосный (телефония) и широкополосный (включая HDTV) на скоростях до 50-70Мбит/с.

Расчёт характеристик передачи является одной из главных задач при построении СД. Он необходим для выбора электрических и оптических интерфейсов (оборудования модемов xDSL, модулей SFP, XFP, транспондеров CWDM/DWDM или интерфейсов STM-N) для известных участков передачи и выбранных для строительства или существующих волоконных, или медных линий.

3 Расчёт характеристик передачи волоконно-оптических линий

Для выполнения расчётов характеристик передачи в волоконно-оптических линиях сетей доступа должны быть уже готовые решения по скоростным режимам передачи на отдельных участках и определены дистанции (или расстояния между оптическими передатчиками и приёмниками. Также должны быть выбраны или назначены типы кабельных линий и волокон. В случае реализации режимов передачи *WWDM*, *CWDW* и *DWDM* должны быть предложены соответствующие волны или диапазоны волн. Всё это необходимо для подбора соответствующих модулей оптических *SFP* или *XFP*. Кроме того, режимы передачи *CWDW* или *DWDM* возможны в сети доступа с устройствами ввода вывода отдельных оптических каналов средствами мультиплексоров *OADM* и *ROADM*, что может сделать СД гибкой масштабируемой под соответствующий трафик. Однако при этом потребует проведение специальных расчётов оптических каналов на предмет выполнения оптического соотношения сигнал/шум (*OSNR*). Т.о расчёты в оптической сети

доступа могут выполняться по различным методикам с учётом различных ограничивающих факторов: затухания волокна; сварных стыков разъёмных стыков потерь; вносимых оптическими мультиплексорами и демультиплексорами; аттенюаторами компенсаторами дисперсии хроматической дисперсии; поляризационной дисперсии; оптического соотношения *OSNR*; всех указанных факторов на различных волнах с учётом ограничений по максимальной мощности для исключения нелинейных оптических эффектов.

В этой связи представляют интерес отдельные методики расчёта оптических сетей доступа различных физических конфигураций точка-точка *P2P* пассивное дерево с одним или несколькими

разветвителями *PON - P2MP*, с одним или несколькими волновыми маршрутизаторами *PON –WDM*, активное кольцо с *OADM*/*ROADM* в режимах *CWDM* и *DWDM*) скоростных возможностей (от *10 Мбит/с* до *10 Гбит/с*, а в перспективе до *100 Гбит/с*) и типов волоконных световодов (*G.651 MMF, G.652 SMF и G.657SMF*).

Возможности оптической передачи в СД определяются возможностями оптических модулей *SFP* и *XFP*, в чём нетрудно убедиться, взглянув на примеры характеристик приведённые в табл. 1-5. Ключевым параметром для оценки дистанции передачи *P2P* в одномодовом волокне на скоростях до *2.5 Гбит/с* является энергетический потенциал или бюджет мощности При использовании волокон *MMF* во внимание должны приниматься и энергетический потенциал и ограничение по полосе пропускания. Однако в конфигурации *P2MP WWDM* и в случае реализации *CWDM* и *DWDM* уже на скорости *1.25 Гбит/с* должен учитываться в расчёте штраф за дисперсионные потери. И чем протяженнее линия тем больше этот штраф.

При оценке возможностей передачи в СД на скорости около *10 Гбит/с* к выше перечисленным ограничивающим факторам добавляются и увеличение штрафа за дисперсионные потери и вместе с ним добавляется ограничение по *ПМД* и оценка *OSNR* в оптическом канале *CWDM*/*DWDM*.

Т.о. методики расчётов различаются. Методики в основном стандартизированы *ITU-T* и представлены соответствующими рекомендациями Примеры их использования приведены в учебном пособии, однако для полноты представления о расчётах ниже приведены базовые расчётные формулы с примерами исходных данных для различных конфигураций СД и скоростных режимов

Таблица 1 характеристика модулей *SFP* на скорости *1000 Мбит/с*

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	100Base LX	100Base BX10-U/D	100Base ZX
Макс. электрич. мощность, Вт	0,75	1,3	0,75
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция, км	до 10	до 10	до 70-80
Рабочая волна, нм	1310	1310(прямая) 1530(обратная)	1550
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	10	10	27
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-14	-14	-2
Миним. уровень мощности, дБм	-23,5…-20	-23,5…-20	-3
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-33,5	-33,5	-30
Максим. входной уровень на приём, дБм	-	-	-8

Таблица 2 характеристика модулей *XFP* на скорости *1000 Мбит/с*

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	1000Base SX(LC)	1000Base SX(MT-RJ)	1000Base LX
Макс. электрич. мощность, Вт	-	-	1,0
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс MT-RJ	Дуплекс LC
Тип волокна	MMF, 62,5мкм 50мкм	MMF, 62,5мкм 50мкм	MMF, 62,5мкм 50мкм SMF, 9мкм
Дистанция	До 275м До 550м	До 275м До 550м	До 550м MMF До 10км SMF
Рабочая волна, нм	850	850	1310
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	7	7	10,5
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-4	-4	-3
Миним. уровень мощности, дБм	-10	-10	-9,5
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-17	-17	-20
Максим. входной уровень на приём, дБм	0	0	-3

Таблица 3 - Характеристика модулей *SFP* на скорости *1000* Мбит/с *CWDM*

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP	
	1000Base XD CWDM	1000Base ZX CWDM
Макс. электрич. мощность, Вт	1,0	1,0
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Скорость передачи данных, Гбит/с	1,0	1,0
Линейная скорость, Гбит/с	1,25	1,25
Диапазон рабочих температур	0-60град	0-60град
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	17	24
Рабочие волны (центр), нм	1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611	1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611
Максим. штраф за дисперсию, дБ	1дБ на 40 км	2дБ на 70 км
Характеристики передачи		
Максим. уровень мощности, дБм	+1	+5
Миним. уровень мощности, дБм	-4	0
Характеристики приёма		
Чувствительность приёмника, дБм	-21	-24
Максим. входной уровень на приём, дБм	-3,0	-3,0

Таблица 4 - Характеристика модулей *SFP* на скорости *1000 Мбит/с IEEE*

Характеристики	Спецификация оптических модулей SFP		
	IEEE 802.3ah 1000Base BX10	IEEE 802.3ah 1000Base BX40	1000Base EX
Макс. электрич. мощность, Вт	1,0	1,0	1,2
Тип коннектора	Дуплекс LC	Дуплекс LC	Дуплекс LC
Тип волокна	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция	До 10км	До 40км	До 120км
Рабочая волна, нм	1310, 1490	1310, 1490	1550
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	10,5	20,0	30,0
Максим. штраф за дисперсию, дБ	3,3	3,3	До 2дБ на
			120км
Характеристики передачи			
Максим. уровень мощности, дБм	-3	+3,0	+5
Миним. уровень мощности, дБм	-9	-3,0	0
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-19,5	-23	-30
Максим. входной уровень на приём, дБм	-3,0	-3,0	-9,0

Таблица 5 - Характеристика модулей *XFP* на скорости *1000 Мбит/с IEEE 802.3ae*

Характеристики	Спецификация оптических модулей XFP		
	IEEE 802.3ae 10GBase-SR	IEEE 802.3ae 10GBase-LR	IEEE 802.3ae 10GBase-ER/EW
Скорость передачи данных, Гбит/с	10	10	10
Линейная скорость, Гбит/с	10,3125±100 ppm	10,3125±100 ppm/ 9,963±20ppm	10,3125±100 ppm / 9,963±20ppm
Срок службы, часов	675000	675000	675000
Рабочие волны, нм	840-860	1260-1365	1530-1565
Тип волокна и дистанция на MMF	MMF, 62,5мкм от 2 до 26м 160МГц/км От 2 до 33м 200МГц/км 50мкм от 2 до 300м с полосой от 400 до 2000МГц	SMF, 9мкм	SMF, 9мкм
Дистанция		До 10км	До 40км
Энергетический потенциал или бюджет мощности, дБ	7,3	9,4	15,0
Максим. штраф за дисперсию, дБ	3,9 на 300м	3,2 на 10км	3дБ на 40км
Характеристики передачи			
Уровень мощности, дБм	От -7,3 до -1,0	От -8,2 до +0,5	От -4,7 до +4
Подавление боковых мод, дБ	30	30	30
Характеристики приёма			
Чувствительность приёмника, дБм	-11,1	-12,6	-11,3
Максим. входной уровень на приём, дБм	0	+1,5	+4

Таблица 6 - Характеристика модулей *XFP* на скорости *1000 Мбит/с с DWDM*

Характеристика	Спецификация 10GBase DWDM XFP
Линейная скорость	10,3125 Гбит/с ±100ppm 9,95328 Гбит/с ±100ppm
Максимальный срок службы	4×10^6 часов
Волновой интервал DWDM	1530,33нм до 1545,32нм
Стабильность волны	±100пм
Дистанция	До 80 км
Энергетический потенциал или бюджет мощности	23 дБ
Дисперсионный штраф и сигнал/шум	3дБ, 1600пс/нм (OSNR>30дБ)
Характеристики передачи	
Подавление боковых мод в одномодовом лазере	40дБ
Диапазон уровней мощности передачи	От -1 дБм до +3дБм
Характеристики приёма	
Номинальные скорости	10,3125 Гбит/с ±100ppm 9,95328 Гбит/с ±100ppm
Максимальная чувствительность приёмника	-24,5 дБ (при OSNR>30дБ)
Порог перегрузки приёмника	+1дБм
Максимальный коэффициент отражения приёмника	-27дБ
Допустимая поляризационная модовая дисперсия (ПМД)	15пс (при штрафе в 1дБ для OSNR)
Стандартные волны (20) для DWDM XFP модулей с частотным интервалом 100ГГц	1530,33нм; 1531,12нм; 1531,9нм; 1532,68нм; 1533,47нм; 1534,25нм; 1535,04нм; 1535,82нм; 1536,61нм; 1537,4нм; 1538,19нм; 1539,77нм; 1540,56нм; 1541,36нм; 1542,14нм; 1542,94нм; 1543,73нм; 1544,53нм; 1545,32нм

Расчёт по бюджету мощности и дисперсии для одноканальной и многоканальной передачи на заданной длине волны при скорости от *10 Мбит/с* до *1250 Мбит/с* и более.

Расчёт производится для одномодовых и многомодовых линий. В расчёт показатели для энергетического потенциала бюджета мощности обозначаемого в дальнейшем *A* и полосы пропускания волоконной (допустимой дисперсии прежде всего межмодовой для многомодовых но с учётом и хроматической дисперсии и для од-

номодовых волокон хроматической дисперсии), обозначаемой в дальнейшем ΔF или знаком дисперсии τ.

Значение A приведено в таблицах 1-6. Оно получено путём вычитания

$$P_{пер.миним} - P_{пр.миним} = A, \qquad (1)$$

Например, по таблице 1 $A = 10дБ = -23дБм - (-33{,}5дБм)$. Обозначение $дБм$ указывает на то, что эта величина оценивается относительно мощности $мВт$ т.е уровень по мощности.

Величина A должна быть больше или крайнем случае равна совокупным потерям оптической мощности на рассчитываемом участке СД,

$$A \geq \sum совокупных\, потерь = \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m, \qquad (2)$$

где α - километрическое или погонное затухание волокна на заданной длине волны ($дБ / км$), L - длина линии (км), α_{PC} - затухание на разъёмном стыке волокна ($дБ$) обычно не более $0{,}5дБ$, n - число разъёмных стыков между передатчиком и приёмником α_{CC} затухание на сварном стыке волокон ($дБ$) обычно не более $0.2дБ$, m - число сварных стыков (зависит от числа строительных длин на участке между передатчиком и приёмником). При использовании одной длины волны для передачи и приёма оптических сигналов в двух волоконной схеме расчёт производится единожды, например, для интерфейса *100Base LX*. Однако если используется одно волоконная схема и две волны передачи, например, для интерфейса *100Base BX*, необходим расчёт на волнах *1310нм* и *1530нм* и также необходимо учесть потери которые будут в направленном разветвителе или в пространственном оптическом фильтре, служащим для объединения и разделения волн передачи и приёма. В этом случае типовые потери составят до *3.1дБ* на каждой из двух сторон одноволоконной линии и соотношение получит добавление α_{HO}:

$$A \geq \sum = \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} \qquad (3)$$

Для протяженных оптических линий как правило свыше *10 км (40,80,120км)* и на скоростях передачи цифровых данных свыше *1000Мбит/с (до 10-40-100Гбит/с)* принято согласно международной стандартизации оптических интерфейсов учитывать штраф оптической мощности за поляризационные потери и за нелинейные эффекты, и за ухудшение характеристик волокна (таблица 3-6). В этом случае дополнительные потери могут составить от *1* до *3-4дБ* и более, и соотношение (3) получит добавление $\alpha_{Ш}$:

$$A \geq \sum = \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} \qquad (4)$$

При использовании в СД мультиплексоров *OADM/ROADM* актуальным становится учёт потерь оптической мощности при выделении/вводе оптических каналов которое возможно при одноволоконной и двухволоконной организации связи. Т.о при скоростях *1250Мбит/с* и *2,5Гбит/с* актуально учитывать все выше рассмотренные потери мощности каждого оптического канала и добавлять к ним потери в оптическом мультиплексоре при выделении и вводе α_{AD} типовые значения которых могут составить от *0,5дБ* до *4,5дБ* на выделение или ввод:

$$A \geq \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} + \alpha_{AD} \qquad (5)$$

Для протяженных волоконно-оптических линий могут предусматриваться оптические усилители, которые увеличивают бюджет мощности и тогда соотношение (5) может быть дополнено величиной оптического усиления *S* (типовые значения от *5 дБ* до *20-30 дБ)*. При этом усилители могут совмещаться с передатчиками приёмниками и располагаться в качестве самостоятельных сетевых элементов в виде промежуточных станций, повышающих энергетический потенциал:

$$A + S \geq \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} + \alpha_{AD} \quad (6)$$

На протяженных линиях как правило свыше *40 км* и со скоростями передачи цифровых сигналов от *2.5 Гбит/с* и выше применяются компенсаторы хроматической дисперсии одномодовых световодов. Если эти компенсаторы представляют собой катушки со специальными волокнами противоположно дисперсии (на волне *1550 нм* хроматическая дисперсия *+18 пс/нм×км*, а у компенсатора она *-100 пс/нм×км)*, то они имеют внушительное затухание от *3 дБ* и более, что обязательно должно учитываться при оценке энергетического потенциала в виде добавки $\alpha_{КД}$

$$A \geq \alpha \times L + \alpha_{PC} \times n + \alpha_{CC} \times m + 2 \times \alpha_{HO} + \alpha_{Ш} + \alpha_{AD} + \alpha_{КД} \quad (7)$$

Соотношение для оценки бюджета мощности оптической линии или оптического канала (7) наиболее полно учитывает все проблемы потерь мощности при этом нужно учесть, что возможны повреждения линии ухудшение характеристик передачи отдельных активных и пассивных компонентов учтены в запасе мощности как разности между максимальной мощностью передатчика и его минимальной мощностью, например, для интерфейса *1000Base EX* он составляет *5 дБ*. Также необходимо отметить что в некоторых интерфейсах, работающих на скорости *10Гбит/с* могут использоваться средства упреждающей коррекции ошибок *FEC*, которые позволяют увеличить энергетический потенциал без дополнительных усилителей на *3-8 дБ*. Сведения о таких решениях необходимо проверять по конкретным характеристикам оборудования.

Учёт энергетических возможностей *PON* может отличаться от рассмотренной цепочки вычислений *1-7* различным положением разветвителей и коэффициентами ветвления [30], что обусловлено различным пространственным положением терминалов *ONT* или *ONU*. Примеры характеристик ветвления в *PON* представлены в таблице 7. Расчёт потерь при ветвлении производится простыми

вычислениями потерь ветвления и собственных потерь (возвратных поляризационно-зависимых и от неравномерности деления):

$$\alpha_{PON} \geq 10\,lg\left(P_{BX} / P_{BЫX} \right) + \alpha_C \qquad (8)$$

Где величина α_C не превышает *0,3 дБ*. При равномерном делении мощности соотношение можно записать:

$$\alpha_{PON} \geq 10\,lg\,N + \alpha_C \qquad (9)$$

При неравномерном делении в (8) подставляется коэффициент процентного деления, т.е. $P_{BX} = 100\%$, $P_{BЫX} = X\%(10\%, 20\%, 70\%.....)$.

Таблица 7 Характеристики разветвителей *PON*

Разветвитель 1×N, равномерное деление			Разветвитель 1×2, неравномерное деление		Разветвитель 1×3 неравномерное деление	
N	% ветвления	Потери мощности, дБ	% ветвления	Потери мощности, дБ	% ветвления	Потери мощности, дБ
2	50	2.9-3.3	50/50	3.1/3.1	10/45/45	10.5/4.0/4.0
3	33	4.8-5.2	45/55	3.6/2.7	20/40/40	7.3/4.5/4.5
4	25	5.5-6.7	40/60	4.1/2.3	30/35/35	5.4/4.8/4.8
5	20	6.9-7.8	35/65	4.7/2.0	40/30/30	4.1/5.4/5.4
6	16.7	8-8.5	30/70	5.4/1.7	50/25/25	3.1/6.2/6.2
7	14.3	9.1-9.6	25/75	6.2/1.4	60/20/20	2.3/7.2/7.2
8	12.5	9.8-10.1	20/80	7.5/1.2	70/15/15	1.7/8.5/8.5
10	10	10.8-11.1	15/85	8.4/0.8	80/10/10	1.0/10.5/10.5
12	8.3	11.9-12.0	10/90	10.2/0.6		
16	6.3	13-13.5	5/95	13.2/0.4		
32	1.6	16.2-17.0	1/99	20.5/0.3		

Для наглядности расчётов изменения уровня мощности оптического сигнала в цепочке передачи рекомендуется построить диаграмму уровней [30].

Также важной составляющей к расчёту бюджета мощности необходимо отнести расчёт возможной перегрузки приёмника на короткой линии, когда ослабления оптической мощности в линии недостаточно по техническим характеристикам. Если в результате расчёта по формулам 1-7 уровень мощности на входе приёмника превысит порог перегрузки или максимальный уровень на входе (см табл. 3), то необходимо подобрать компенсирующий избыточную мощность аттенюатор.

Дисперсия оптических импульсов в волоконных световодах СД может накладывать ограничения по дистанции передачи не только в волокнах *MMF*, но и в волокнах *SMF*. По этой причине необходимы оценочные проверки по допустимой дисперсии или полосе пропускания расчётов дистанции по бюджету мощности.

В реальных многомодовых волокнах полоса частот с увеличением длины волокна *L* уменьшается и может быть приближенно определена из выражения:

$$\Delta F(L) = \frac{\Delta F}{L^{\gamma}} \qquad (10)$$

где ΔF - ширина полосы частот приведенная к единице длины волокна, удельная полоса $[МГц \times км]$; $\gamma = 0{,}5 \div 0{,}8$ - коэффициент учитывающий влияние реального профиля показателя преломления сердцевины волокна и закон изменения полосы частот с увеличением длины волокна (для градиентного волокна 0,5 для ступенчатого волокна 0,8).

Величина удельной полосы определяется дисперсией волокна:

$$\Delta F = \frac{0{,}44}{\tau} \qquad (11)$$

где

$$\tau = \sqrt{\tau_{мм}^2 + [\Delta\lambda \times \tau_x(\lambda)]^2} \qquad (12)$$

$\tau_{мм}$ - межмодовая дисперсия; $\Delta\lambda \times \tau_x(\lambda)$ - хроматическая дисперсия многомодового волокна.

Ширина спектра излучения $\Delta\lambda\ [нм]$ определяется для передатчика на уровне мощности равной половине максимальной.

$\tau_x(\lambda)[пс/(нм \times км)]$ - коэффициент удельной хроматической дисперсии.

Для многомодовых волокон величина ΔF приводится в их характеристиках и составляет от *500* до *1200 МГц*км.*

При оценке ширины полосы частот $\Delta F(L)$ одномодового волокна длиной L известны различные подходы изложенные в вышеуказанных изданиях. Дисперсия оценивается по среднеквадратическому уширению импульса $\tau_{СКУ}$, по уширению импульса на уровне половины максимальной мощности $\tau_{0,5}$, по времени нарастания импульса от 0,1 до 0,9 $\tau_Н$ его максимального значения мощности. Все эти способы оценки связаны между собой соотношением (13):

$$\Delta F \times L = \frac{0.187}{\tau_{СКУ}} = \frac{0,44}{\tau_{0,5}} = \frac{0,312}{\tau_Н} \qquad (13)$$

Полоса частот оптического одномодового волокна также уменьшается с увеличением длины волокна L как и у многомодового (9), однако коэффициент $\gamma = 1$.

Скорость передачи линейного сигнала B и полоса пропускания волокна связаны приблизительным неравенством численных значений т.е. $\Delta F \geq B$. При этом форматы кодирования линейного импульсного сигнала (NRZ и RZ) влияют на ширину спектра сигнала и отличие в требуемой полосе ΔF может составить около *2х* раз в формате *RZ*. Значение дисперсии, приводимое в характеристиках волокон, это $\tau_{СКУ}$. Необходимо обращать внимание при расчётах протяженных линий на скорости *10Гбит/с* на технические характе-

ристики ширины спектра одномодовых лазеров $\Delta\lambda$, которая указывается для уровня *-20дБм* от максимума излучаемой мощности и пересчитывать на уровень *0,5* от максимальной мощности.

Другим приёмом расчёта дисперсии в линии СД можно воспользоваться, если известно допустимое значение совокупной дисперсии меж передатчиком и приёмником оптического сигнала которое указывается в *пс/нм*.

Например, допустимая хроматическая дисперсия интерфейса SDH S1.1 составляет *96пс/нм*. Линия с волокном G.652 длиной *10 км* на волне *1310 нм* при удельной дисперсии *3.5 пс/нм×км* будет иметь дисперсию *35 пс/нм* т.е меньше допустимой. При этом в расчёт не принимается ширина спектральной линии передатчика, но если она меньше или равна *1 нм*. Если она более *1 нм*, то обязательно полученное значение дисперсии должно быть умножено на ширину спектра.

В том случае, когда характеристики дисперсии редуцированы или вообще отсутствуют в данных на интерфейсы, тогда следует руководствоваться ограничениями, обозначенными по бюджету мощности производителем.

2. Расчёт для многоканальных волоконных линий СД с применением повышенной мощности передачи, в частности линий с каналом для телевизионного вещания на волне *1550 нм,* актуален по причине возможных эффектов рассеяния, которые могут приводить к помехам в соседних оптических каналах. Кроме того, перспективы развития оптических СД связываются с широким внедрением DWDM благодаря выпуску относительно дешевых модулей SFP, XFP, оптических усилителей оптических маршрутизаторов волн (OADM/ROADM).

Задачей проектирования является оценка соотношения сигнал/помеха в каждом волновом канале. Величина этого соотношения зависит от выбранного режима мощности передатчика совокупного числа волновых каналов, длин волн, типа стекловолокна и его протяженности. Оптические помехи в канале могут накапливаться и возрастать на выходе каждого усилителя, мультиплексора OADM/ROADM. Это требует установки через определенное расстояние регенераторов, которые исключат дисперсионные искажения и накопленные помехи в каждом отдельном канале. Расчет от-

ношения сигнал/помеха на входе приемника многоволновой системы передачи для одного из *N* каналов при использовании только оптических усилителей производится через формулу (14):

$$OSNR = P_{ch} - a_s - NF - 10\,lg\,M_{ус} + 58\,дБ \qquad (14)$$

где P_{ch} - минимальный допустимый уровень мощности сигнала в одном канале, a_s - усиление оптического усилителя, например эрбиевого *EDFA*, *NF*-коэффициент шума усилителя (для *EDFA 5-6 дБ*), значение *58 дБ* представляет собой оптический квантовый шум в полосе канала на входе усилителя для скорости передачи до *2.5 Гбит/с* ($\Delta f = 2.5 ГГц$) т.е

$$-58\,дБ = 10\,lg(h \times f \times \Delta f) \qquad (15)$$

Минимальный уровень мощности на входе усилителя для одного канала определяется формулой 16:

$$P_{ch\ min} = OSNR + a_s + NF + 10\,lg\,M_{ус} - 58\,дБ \qquad (16)$$

Если скорость передачи данных в оптическом канале возрастает, например, до *10 Гбит/с*, то необходимо пересчитать оптический квантовый шум. Для *10 Гбит/с* шум составит уже *-58 дБ* при формате модуляции NRZ. Максимальный уровень мощности на выходе усилителя многоволновой системы передачи для одного из каналов *N* определяется соотношением 17:

$$P_{ch\ max} = P_{max} - 10\,lg\,N \qquad (17)$$

где P_{max} - максимальный допустимый уровень передачи в стекловолокне (например в волокне *G.652* эта величина $+17дБ$) ограниченный нелинейными эффектам, N - число оптических каналов. При вычислении уровней передачи рекомендуется строить диаграмму уровней оптического канала по всем промежуточным станциям (усилителям). Это позволит оценить величину в каждом канале по формуле 18:

$$OSNR_{out} = 10\,lg(10^{0.1(P_{in1} - NF_1 - 10\,lg(hf\Delta f))} + 10^{0.1(P_{in2} - NF_2 - 10\,lg(hf\Delta f))} + ... + 10^{0.1(P_{inN} - NF_N - 10\,lg(hf\Delta f))} \quad (18)$$

где $OSNR_{out}$ отношение оптический сигнал/шум на выходе канала (задаётся в оптическом интерфейсе, см. пример в табл. 6); $P_{in1}, P_{in2}, ..., P_{inN}$ уровни мощности оптического канала на входах различных оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал; $NF_1, NF_2, ..., NF_N$ коэффициенты шума оптических сетевых элементов, через которые проходит оптический канал; h постоянная Планка, согласованная с уровнем мощности $(мДж \times с)$; f центральная частота оптического канала ($Гц$); Δf полоса частот оптического канала ($Гц$) аналогично (15).

4 Задание

По заданию преподавателя в соответствии с таблицей 8 по вышеприведенной методике осуществить расчёт энергетического потенциала (бюджета мощности) обозначаемого *A*. Величина *A* должна быть больше или крайнем случае равна совокупным потерям оптической мощности на рассчитываемом участке СД. Если используется одно волоконная схема и две волны передачи, например, вариант 2,5,9 и 10, необходим расчёт на двух волнах. Километрическое затухание обозначено для этих вариантов через тире для разных длин волн. Затухание от мультиплексоров *OADM/ROADM* и компенсаторов хроматической дисперсии не учитывать.

Таблица 8 – Варианты заданий на лабораторную работу

Номер варианта	Количество Волн передачи	L км	α $дБ/км$	$\alpha_{РС}$ $дБ$	n	$\alpha_{СС}$ $дБ$	m	$\alpha_{НО}$ $дБ$	$\alpha_{Ш}$ $дБ$
1	1	5	0,33	0,5	2	0,2	2	3,1	1
2	2	18	0,33-0,22	0,4	4	0,2	4	3,1	2
3	1	8	0,22	0,5	2	0,3	3	3,1	1
4	1	40	0,33	0,45	2	0,2	2	3,1	4
5	2	7	0,33-0,22	0,6	4	0,1	1	3,1	3
6	1	50	0,33	0,4	2	0,25	2	3,1	4
7	1	45	0,22	0,3	4	0,3	3	3,1	4
8	1	35	0,22	0,4	2	0,2	4	3,1	3
9	2	6	0,33-0,22	0,3	2	0,1	3	3,1	1
10	2	8	0,33-0,22	0,2	2	0,3	2	3,1	1
11	1	5	0,22	0,4	4	0,1	2	3,1	1
12	1	82	0,33	0,3	2	0,2	1	3,1	4

5 Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте понятие Сеть Доступа.
2. Дайте описание технологии GEPON.
3. Перечислите основные задачи проектирования сети NGN.
4. Перечислите необходимые исходные данные для расчета характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.
5. Поясните методику расчетов характеристик передачи волоконно-оптических линий связи.

Библиографический список

1. Фокин, В. Г. Проектирование оптической сети доступа : учебное пособие / В. Г. Фокин. - Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012. - 311 с. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=431523 (дата обращения 27.10.2023) . - Режим доступа : по подписке. - Текст : электронный

2. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учебное пособие / О. К. Скляров. – Москва : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 266 с. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=117684 (дата обращения 27.10.2023). – Режим доступа : по подписке. – Текст : электронный.

3. Шарангович, С.Н. Многоволновые оптические системы связи : учебное пособие / С.Н. Шарангович. – Томск : ТУСУР, 2016. – 156 с. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=492591 (дата обращения 27.10.2023) . - Режим доступа : по подписке. - Текст : электронный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения лабораторных работ студент формирует следующие компетенции:

Код компетенции/ этап *(указывается название этапа из п.7.1)*	Показатели оценивания компетенций *(индикаторы достижения компетенций, закрепленные за дисциплиной)*	Критерии и шкала оценивания компетенций			
		Недостаточный уровень («неудовл.»)	Пороговый уровень («удовлетворительно)	Продвинутый уровень (хорошо»)	Высокий уровень («отлично»)
1	2	3	4	5	6
ПК-2/ Основной, завершающий.	ПК-2.1 Контролирует соблюдение утвержденных проектных решений при подготовке исполнительной документации. ПК-2.2 Уточняет проектную документацию и вносит изменения при изменении тех-	**Знать:** Отдельные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Демонстрирует менее 60% знаний, указанных в таблице 1.3 для ПК-2. Обу-	**Знать:** Основные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Демонстрирует 60-74% знаний, указанных в таблице 1.3 для ПК-2. Знания	**Знать:** Методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Демонстрирует 75-89% знаний, указанных в таблице 1.3 для ПК-2.	**Знать:** Эффективные современные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Демонстрирует 90-100% знаний, указан-

Код компетенции/ этап *(указывается название этапа из п.7.1)*	Показатели оценивания компетенций *(индикаторы достижения компетенций, закрепленные за дисциплиной)*	Критерии и шкала оценивания компетенций			
		Недостаточный уровень («неудовл.»)	Пороговый уровень («удовлетворительно)	Продвинутый уровень (хорошо»)	Высокий уровень («отлично»)
1	2	3	4	5	6
	нических решений. ПК-2.3 Разрабатывает исполнительную документацию в составе группы соисполнителей-смежников.	чающийся нуждается в постоянных подсказках; допускает грубые ошибки, которые не может исправить самостоятельно. **Уметь:** Применять отдельные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов.	обучающегося имеют поверхностный характер, имеют место неточности и ошибки. **Уметь:** Применять основные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. В целом сформированные, но вызы-	Обучающийся имеет хорошие, но не исчерпывающие знания; допускает неточности. **Уметь:** Применять методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Сформированные и самостоятельно	ных в таблице 1.3 для ПК-2. Знания обучающегося являются прочными и глубокими, имеют системный характер. Обучающийся свободно оперирует знаниями. **Уметь:** Применять эффективные современные методы проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структу-

Код компетенции/ этап *(указывается название этапа из п.7.1)*	Показатели оценивания компетенций *(индикаторы достижения компетенций, закрепленные за дисциплиной)*	Критерии и шкала оценивания компетенций			
		Недостаточный уровень («неудовл.»)	Пороговый уровень («удовлетворительно)	Продвинутый уровень (хорошо»)	Высокий уровень («отлично»)
1	2	3	4	5	6
		Демонстрирует менее 60% умений, установленных в таблице 1.3 для ПК-2. **Владеть:** Навыками применения отдельных методов проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Навыки, указанные в таблице 1.3 для	вающие затруднения при самостоятельном применении умения, указанные в таблице 1.3 для ПК-2. **Владеть:** Навыками применения основных методов проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Навыки, ука-	применяемые умения, указанные в таблице 1.3 для ПК-2. **Владеть:** Навыками применения методов проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых узлов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Навыки, указанные в таблице 1.3 для ПК-2,	рированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Хорошо развитые, уверенно и успешно применяемые умения, указанные в таблице 1.3 для ПК-2. **Владеть:** Навыками применения эффективных современных методов проектирования и разработки интерфейсных модулей сетевых уз-

Код компетенции/ этап *(указывается название этапа из п.7.1)*	Показатели оценивания компетенций *(индикаторы достижения компетенций, закрепленные за дисциплиной)*	Критерии и шкала оценивания компетенций			
		Недостаточный уровень («неудовл.»)	Пороговый уровень («удовлетворительно)	Продвинутый уровень (хорошо»)	Высокий уровень («отлично»)
1	2	3	4	5	6
		ПК-2, не развиты	занные в таблице 1.3 для ПК-2, развиты на элементарном уровне.	хорошо развиты.	лов, создания структурированных кабельных систем, в том числе для малых космических аппаратов. Навыки, указанные в таблице 1.3 для ПК-2, хорошо развиты.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Форма титульного листа отчета, обучающегося о выполненной лабораторной работе

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Кафедра космического приборостроения и систем связи

ОТЧЕТ
о выполненной лабораторной работе по дисциплине
«Проектирование оптических сетей доступа»
на тему «_____»

Выполнил _____ /Фамилия, инициалы/
(подпись)

Проверил _____ /Фамилия, инициалы/
(подпись)

Курск 20___