

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра линий связи и измерений в технике связи

М.В. ДАШКОВ, К.А. ВОЛКОВ

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АППАРАТУРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ**

Методические указания
по выполнению курсовых работ

Самара
2016

УДК 621.39.082.5

ББК 621.391.63

Д

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ, протокол
№ 42 от 07.06.2016 г.

Рецензент:

доцент, кафедра систем связи ФГБОУ ВО ПГУТИ,
к.т.н., Трошин А.В.

Дашков, М.В., Волков, К.А.

Д Модернизация волоконно-оптической линии передачи с использованием аппаратуры спектрального уплотнения: методические указания по выполнению курсовых работ / М.В. Дашков, К.А. Волков. – Самара: ПГУТИ, 2016. – 24 с.

Методические указания содержат задание и порядок выполнения курсовых работ, разработаны в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика, и предназначены для студентов 4 курса для проведения практических занятий.

©, Дашков М.В., 2016

©, Волков К.А., 2016

Постановка задачи. В настоящее время для увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) широко используется технология спектрального уплотнения. Принцип работы данной технологии основан на передаче по оптическому волокну нескольких потоков данных на различных длинах волн - оптических каналов. На сегодняшний день спектральное уплотнение является наиболее доступной и коммерчески эффективной технологией как при модернизации существующих, так и при строительстве новых ВОЛП. Одновременно с этим увеличение пропускной способности обеспечивается за счет внедрения высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Для магистральных ВОЛП сетей связи РФ на текущий момент типовая скорость в оптическом канале составляет 10 Гбит/с и 40 Гбит/с, на отдельных участках имеется тенденция перехода на уровень 100 Гбит/с.

В отличие от стандартных одноканальных систем внедрение высокоскоростных систем волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов (ВОСП-СР) требует особого подхода и рассмотрения таких вопросов как выбор формата представления передаваемой двоичной информации, выбор и размещение компенсаторов хроматической дисперсии, выбор параметров и расстановка оптических усилителей, учет влияния поляризационной модовой дисперсии и нелинейных эффектов, а также выбор кодера упреждающей коррекции ошибок.

Целью данной работы является разработка технических предложений по модернизации волоконно-оптической линии передачи с использованием аппаратуры спектрального уплотнения.

1. Исходные данные

1.1. Участок ВОЛП, подлежащий модернизации, состоит из 5 элементарных кабельных участков (ЭКУ).

1.2. Протяженность ЭКУ $L_{\text{ЭКУ}}$ определяется из таблицы 1.

Таблица 1. Расчет протяженности ЭКУ

Номер ЭКУ	1	2	3	4	5
$L_{\text{ЭКУ}}, \text{ км}$	$105-2*m+n$	$91+2*m-n$	$135-m-n$	$98-m+n$	$120+m-n$

где mn – последние 2 цифры зачетной книжки.

1.3. Тип оптического волокна (ОВ), используемого на ВОЛП определяется в следующем виде:

$$\text{Тип ОВ} = (mn) \bmod 4, \quad (1)$$

где mn – последние 2 цифры зачетной книжки.

$(mn) \bmod 4$ – обозначает остаток от деления нацело mn на 4. Например, если последние две цифры зачетной книжки 67, то $67:4 = 16,75$. Следовательно $(67) \bmod 4 = 67-16*4 = 3$.

Таблица 2. Выбор типа ОВ

$(mn) \bmod 4$	Тип оптического волокна
0	Стандартное ступенчатое одномодовое рек. G.652.A
1	Стандартное ступенчатое одномодовое рек. G.652.D
2	Одномодовое ОВ с ненулевой смещенной дисперсией рек. G.655.A
3	Одномодовое ОВ с ненулевой смещенной дисперсией рек. G.655.D

1.4. Согласно техническому заданию требуется повысить пропускную способность существующей ВОЛП за счет увеличения скорости передачи в оптическом канале и использования технологии спектрального уплотнения.

Скорость передачи (B , Гбит/с) в оптическом канале определяется согласно таблице 3.

Таблица 3. Выбор скорости передачи

Условие	В, Гбит/с	Уровень
m - четное	10	STM-64
m - нечетное	40	STM-256

1.5. Количество оптических каналов определяется по формуле:

$$N_{ch} = 2^{2+(mm) \bmod 4}, \quad (2)$$

где mm – последние 2 цифры зачетной книжки.

Рассчитайте суммарную пропускную способность системы спектрального уплотнения по формуле:

$$C = N_{ch} \cdot B, \quad (3)$$

где N_{ch} - количество оптических каналов; B – скорость передачи в канале.

1.6. Выбор рабочей частоты оптического канала в данной работе производится согласно сетке частот МСЭ-Т (см. рек. G.692 и ОСТ 45.178) по следующему правилу:

$$f_{ch,i} = 193.10 \text{ ТГц} + \Delta f \cdot \left(i - \frac{N_{ch}}{2} \right), \quad (4)$$

где $f_{ch,i}$ - рабочая частота i -го оптического канала; i – номер канала, Δf – интервал между каналами. Интервал между каналами определяется из таблицы 4.

Примечание. Соблюдайте размерности! ТГц = 10^{12} Гц, ГГц = 10^9 Гц.

Таблица 4. Интервал между каналами

Условие	Δf , ГГц
m - четное	100
m - нечетное	50

Для выполнения расчетов переведите частоту в длину волны по формуле:

$$\lambda_{ch,i} = \frac{c}{f_{ch,i}} \cdot 10^9, \text{ нм} \quad (5)$$

Здесь c – скорость света в вакууме, равная 299792458 м/с, $f_{ch,i}$ – частота оптического канала, Гц.

Примечание. В формулу подставлять в указанных размерностях. Для проверки – длина волны среднего канала должна быть 1552.52 нм. Округление результата производите до второго знака после запятой.

Полученные значения занесите в таблицу 5.

Таблица 5. Рабочие длины волн оптических каналов

Номер канала	Длина волны канала λ_{ch} , нм
1	
2	
...	...

1.7. При внедрении технологии спектрального уплотнения с использованием высокоскоростных ВОСП производится обязательное обследование линейно-кабельных сооружений, заключающееся в измерении ряда параметров оптического тракта.

Предварительное обследование оптического тракта ВОЛП, подлежащей реконструкции, показало:

1.7.1. При измерении спектральной зависимости коэффициента затухания были получены следующие результаты:

Для ОВ рек. G.652.A, D:

- на длине волны 1550 нм коэффициент затухания α составил:

$$\alpha(1550 \text{ нм}) = 0.19 + 0.01 * [(mn) \bmod 4], \text{ дБ/км.} \quad (6)$$

Зависимость коэффициента затухания от длины волны в С-диапазоне (1520 – 1565 нм) была представлена в виде:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(1550 \text{ нм}) + \frac{0.03}{400} \cdot (\lambda - 1550)^2, \quad (7)$$

где λ - длина волны, нм.

Для ОВ рек. G.655.A, D:

- на длине волны 1550 нм коэффициент затухания α составил:

$$\alpha(1550 \text{ нм}) = 0.2 + 0.01 * [(mn) \bmod 4], \text{ дБ/км.} \quad (8)$$

Зависимость коэффициента затухания от длины волны в С-диапазоне (1520 – 1565 нм) была представлена в виде:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(1550\text{нм}) + \frac{0.025}{400} \cdot (\lambda - 1550)^2 \quad (9)$$

Постройте график зависимости коэффициента затухания от длины волны в диапазоне (1530 – 1625) нм и сформулируйте выводы по нему.

Приведите расчет для трех длин волн: двух крайних и средней.

1.7.2. При измерении хроматической дисперсии были получены следующие результаты:

Для ОВ рек. G.652.A, D:

- длина волны нулевой дисперсии:

$$\lambda_0 = 1300 + m + n, \text{ нм}; \quad (10)$$

- наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии:

$$S_0 = 0.085 + 0.001 \cdot (m - n), \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км}); \quad (11)$$

Расчет коэффициента хроматической дисперсии для стандартного ступенчатого ОВ (G.652) производится по формуле:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}). \quad (12)$$

Здесь S_0 - наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии, пс/(нм²·км); λ_0 - точка нулевой дисперсии, нм.

Для ОВ рек. G.655.A, D параметры дисперсионной характеристики определяются по таблице 6.

Таблица 6. Дисперсионные параметры ОВ рек. G.655.A, D

Условие	Диапазон длин волн, нм	D, пс/(нм км)	S (1550 нм), пс/(нм ² ·км)
n - четное	$\lambda \in (1530-1565)$	2.0 – 4.5	0.07
	$\lambda \in (1565-1625)$	4.5 – 8.5	
n - нечетное	$\lambda \in (1530-1565)$	5.5 – 7.5	0.058
	$\lambda \in (1565-1625)$	7.5 – 11.0	

Расчет коэффициента хроматической дисперсии для волокна со смещенной ненулевой дисперсией (G.655) производится по формуле:

$$D(\lambda) = \left(\frac{D(1565\text{нм}) - D(1530\text{нм})}{35} \left(\lambda - 1565\text{нм} \right) \right) + D(1565\text{нм}) \quad (13)$$

при рабочей длине волны до 1565 нм

$$D(\lambda) = \left(\frac{D(1625\text{нм}) - D(1565\text{нм})}{60} \left(\lambda - 1625\text{нм} \right) \right) + D(1625\text{нм}) \quad (14)$$

при рабочей длине волны до 1625 нм

Рассчитайте значения коэффициента хроматической дисперсии для волокна своего варианта на рабочих длинах волн и постройте график зависимость хроматической дисперсии от длины волны.

Примечание. При количестве оптических каналов более 4-х допускается расчет для двух крайних длин волн и в середине диапазона.

1.7.3. При измерении поляризационной модовой дисперсии были получены следующие результаты:

Для ОВ рек.G.652.A и G.655.A

Номер ЭКУ	1	2	3	4	5
D_{PMD} , пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0.3 + 0.03*m	0.2 + 0.02*n	0.3 + 0.06*m	0.5 - 0.05*m	0.5 - 0.03*n

Для ОВ рек.G.652.D и G.655.D

Номер ЭКУ	1	2	3	4	5
D_{PMD} , пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0.1 + 0.01*m	0.2 - 0.01*n	0.05 + 0.01*n	0.2 - 0.01*n	0.08 + 0.01*n

Рассчитайте значения коэффициента ПМД на ЭКУ.

2. Структурная схема регенерационного участка ВОЛП

В данной работе рассматривается самая простая схема организации связи “точка-точка”. При этом на конечных пунктах размещается оборудование ВОСП и аппаратура спектрального уплотнения, включающая транспондеры (ТрП), оптические мультиплексоры (ОМ) и демультимплексоры (ОДМ). На рис. 1. приведена структурная схема регенерационного участка ВОЛП с аппаратурой спектрального уплотнения для одного направления. В данной работе организация связи производится по двум волокнам – прием и передача по отдельному волокну. В обратном направлении схема будет иметь аналогичный вид.

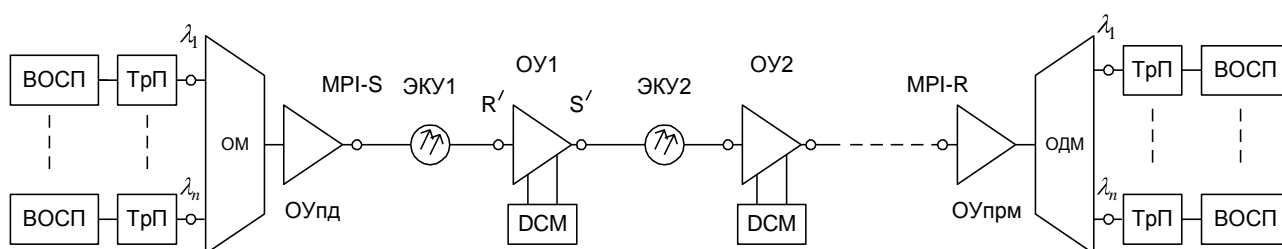


Рис. 1. Структурная схема регенерационного участка

Основные компоненты:

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи STM-64 или STM-256 со стандартным оптическим интерфейсом;

ТрП – транспондер, преобразующий сигнал от ВОСП в оптический сигнал, соответствующий интерфейсу системы уплотнения;

ОМ – оптический мультиплексор, служащий для объединения оптических сигналом на различных длинах волн в групповой поток;

ОУпд – оптический усилитель передачи (бустер), служащий для компенсации затухания в оптических компонентах и обеспечения необходимого уровня сигналов, вводимых в главный оптический тракт;

ЭКУ – элементарный кабельный участок, состоящий из строительных длин оптического кабеля, соединенных оптическими муфтами и смонтированными оконечными устройствами – оптическими кроссами;

ОУ – линейный оптический усилитель, служащий для компенсации затухания на ЭКУ;

DCM – модуля компенсации дисперсии, размещаемый в оптическом тракте для компенсации дисперсионных искажений;

ОУпрм – оптический усилитель приема (предусилитель), служащий для компенсации затухания в оптических компонентах и обеспечения необходимого уровня сигналов, на входе транспондера.

Начертите схему регенерационного участка в соответствии с исходными данными. Указать протяженности ЭКУ, суммарную протяженность РУ и номера рабочих каналов.

3. Расчет модуля компенсации дисперсии

3.1. Расчет допустимой протяженности регенерационного участка

Для высокоскоростных ВОЛП одним из основных ограничивающих факторов является хроматическая дисперсия.

Рассчитайте допустимую протяженность участка регенерации по формуле:

$$L_D \approx \frac{941826 \cdot \varepsilon \cdot f}{D \cdot B^2 \cdot \lambda^2}, \quad (15)$$

где D – коэффициент хроматической дисперсии на рабочей длине волны, пс/(нм·км);

B – скорость передачи, Гбит/с;

λ – рабочая длина волны лазера, мкм;

f – коэффициент заполнения (для NRZ $f = 1$);

ε – параметр, определяемый допустимым штрафом по мощности (для штрафа по мощности 1 дБ $\varepsilon = 0.306$).

Расчеты произведите для двух крайних и среднего оптических каналов из рабочего диапазона. Сделайте выводы о необходимости компенсации хроматической дисперсии.

При расчетах для каналов 40 Гбит/с, учитывайте, что при выборе транспондера с форматом модуляции DQPSK скорость передачи символов 20 Гбод/с, а при формате DPSK – 40 Гбод/с.

3.2. Выбор типа волокна компенсации дисперсии

В настоящее время наиболее широко для компенсации хроматической дисперсии при модернизации ВОЛП используется специальное компенсирующее волокно (DCF), обладающее значительной отрицательной дисперсией, и включаемое в оптический тракт в виде модулей. Модуль компенсации DCM содержит бухту DCF определенной длины и для включения в оптический тракт оснащен или оптическими розетками или оптическими коннекторами. Модули могут размещаться на необслуживаемых усилительных пунктах, а также на оконечных пунктах.

Основные критерии по выбору типа компенсирующего волокна или готового модуля:

- компенсация дисперсии в заданном диапазоне длин волн;

- компенсация наклона дисперсионной характеристики;
- минимальные вносимые потери;
- минимальный уровень вносимой поляризационной модовой дисперсии;
- минимальный уровень нелинейных искажений.

При выборе типа DCF для модернизации ВОЛП с использованием спектрального уплотнения следует учитывать необходимость компенсации во всем рабочем диапазоне с учетом наклона дисперсионной характеристики. Данное условие можно записать в виде:

$$RDS_{DCF} = RDS_{TF}, \quad (16)$$

где RDS_{DCF} , RDS_{TF} – относительный наклон дисперсионной характеристики компенсирующего и телекоммуникационного волокна, используемого на ЭКУ, соответственно, 1/нм:

$$RDS = \frac{S}{D}, \quad (17)$$

где S - наклон дисперсионной кривой, пс/(нм²·км);
 D – коэффициент дисперсии, пс/(нм·км)

Произведите расчет RDS_{TF} телекоммуникационного волокна для средней длины волны из рабочего диапазона по формуле (16), принимая значение $S = S_0$, определенное по формуле (11) и D , рассчитанное для средней длины волны.

Определите RDS_{DCF} для образцов волокна компенсации и выберите марку DCF из таблицы 7 наиболее подходящую по критерию (15). Оцените величину недокомпенсированной хроматической дисперсии для выбранной марки DCF в соответствии с исходными данными по варианту и сделайте выводы.

Таблица 7. Параметры волокон компенсации дисперсии

Марка DCF	D_{DCF} (1550 нм), пс/(нм·км)	S_{DCF} , пс/(нм ² ·км)	α_{DCF} , дБ/км	$D_{PMD DCF}$, пс/√км	A_{eff} , мкм ²
St.-DCF	-100	- 0.23	0.43	0.24	20
EWB-DCF	-120	- 0.44	0.45	0.25	21
HS-DCF	-95	- 0.65	0.42	0.27	15
EHS-DCF	-120	- 1.2	0.45	0.29	14
UHS-DCF	-130	- 2.1	0.48	0.31	14
LL-DCF	-170	- 0.7	0.46	0.35	18

3.3. Расчет параметров модуля компенсации дисперсии

Требуемая длина DCF определяется по формуле:

$$L_{DCF} = -\frac{D_{TF}}{D_{DCF}} L_{TF}, \quad (18)$$

где D_{TF} - коэффициент хроматической дисперсии телекоммуникационного волокна; D_{DCF} - коэффициент хроматической дисперсии компенсирующего волокна; L_{TF} - длина телекоммуникационного волокна, км.

Расчет L_{DCF} произведите для крайних длин волн и средней.

С целью унификации модулей компенсации произведите расчеты L_{DCF} для четырех значений L_{TF} , получив, таким образом, несколько типовых модулей компенсации:

- для ОВ рек. G.652 $L_{TF} = 60; 80; 100; 120$ км.

- для ОВ рек. G.655 $L_{TF} = 80; 140; 200; 240$ км.

Для каждого модуля DCM рассчитайте величину дисперсии по формуле:

$$\sigma_{DCF} = D_{DCF} L_{DCF}, \quad (19)$$

Расчет произведите для двух крайних длин волн из рабочего диапазона и средней длины волны.

Расчет коэффициента дисперсии DCF в зависимости от длины волны произведите по формуле:

$$D_{DCF}(\lambda) = D_{DCF}(1550) + S_{DCF} \cdot (\lambda - 1550), \quad (20)$$

где λ - рабочая длина волны оптического канала, нм; $D_{DCF}(1550)$ - коэффициент хроматической дисперсии на длине волны 1550 нм, пс/(нм·км); S_{DCF} - наклон дисперсионной характеристики, пс/(нм²·км).

Для расчета суммарного затухания модуля компенсации:

$$A_{DCM} = \alpha_{DCF} L_{DCF} + 2 \cdot a_{spl} + 2 \cdot a_{com}, \quad (21)$$

где α_{DCF} - коэффициент затухания DCF, дБ/км; L_{DCF} - длина DCF, км; a_{spl} - затухание на сварном соединении DCF и пиг-тейла, дБ; a_{conn} - затухание на разъемном соединении, дБ.

В расчетах следует принимать $a_{conn} = 0.5$ дБ и $a_{spl} = 0.3$ дБ.

Поскольку DCF обладает повышенным уровнем поляризационной модовой дисперсии, необходимо оценить величину накопленной ПМД по формуле:

$$PMD_{DCM} = D_{PMD} \sqrt{L_{DCF}}, \text{ пс.} \quad (22)$$

Результаты расчетов сведите в таблицу 8.

Таблица 8. Параметры модулей компенсации дисперсии

	DCF-A	DCF-B	DCF-C	DCF-D
L_{TF} , км				
σ_{DCF} , пс/нм				
A_{DCM} , дБ				
PMD_{DCM} , пс				

4. Выбор и размещение модулей компенсации дисперсии

4.1. Модули компенсации дисперсии могут размещаться на промежуточных усилительных пунктах, а также на передающей и принимающей стороне.

Как правило, модуль компенсации размещается между двумя каскадами оптического усилителя, что позволяет скомпенсировать собственное затухание модуля и в тоже время не вызвать увеличения нелинейных эффектов.

Произведите выбор и размещение модулей компенсации в зависимости от протяженности участков компенсации. Как правило, в промежуточных усилительных пунктах размещаются DCM с номиналами, наиболее близкими к длине ЭКУ.

4.2. Расчет остаточной недокомпенсированной дисперсии произведите по формуле:

$$\sigma_{RES} = \sum_{i=1}^5 \sigma_{TF} L_{TF,i} + \sigma_{DCM,i} \quad (23)$$

Расчет производите для двух крайних рабочих длин волн и средней длины волны.

4.3. Сравните полученные значения с максимально допустимыми значениями накопленной хроматической дисперсии выбранного транспондера (см. приложение 2-4).

Примечание. Типовые значения максимальной дисперсии
- для 10 Гбит/с $\sigma_{RES} < 1000$ пс/нм.

Если остаточная дисперсия превышает максимально-допустимые значения, скорректируйте выбор номиналов модулей компенсации дисперсии.

Занесите выбранные типы модулей в соответствии со схемой их размещения в таблицу 9.

Таблица 9. Размещение модулей компенсации дисперсии

Пункт	Тип DCM
ОП-1	
НУП-1	
...	
ОП-2	

4.5. Рассчитайте, как изменяется накопленная хроматическая дисперсия на регенерационном участке по формуле:

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^j \sigma_{TF} L_{TF,i} + \sigma_{DCM,i} \quad (24)$$

где j – номер ЭКУ.

Результаты сведите в таблицу 10 и постройте график зависимости накопленной дисперсии от длины регенерационного участка.

Таблица 10. Изменение дисперсии на регенерационном участке

Участок	σ_{RES} , пс/нм		
ЭКУ 1			
ЭКУ 2			
...			

5. Выбор и размещение оптических усилителей

5.1. Общие положения

Оптические усилители являются важнейшим элементом экономически эффективных ВОЛП с ВОСП-СП и сетей на их основе. В настоящее время наиболее широко применяются оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием - EDFA. EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов без их преобразования в электрические сигналы и обратно, их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна и основным рабочим диапазонам ВОСП-СП (С и L диапазоны) и в настоящее время являются наиболее коммерчески эффективным решением. Оптические усилители работают независимо от протокола сигнала или метода модуляции оптического сигнала. Кроме EDFA усилителей на сетях связи также получают распространения усилители, основанные на явлении вынужденного комбинационного (рамановского) рассеяния. Подобные усилители позволяют добиться низкого уровня собственных шумов и, как правило, используются на протяженных ЭКУ.

В зависимости от местоположения на регенерационном участке оптический усилитель может быть классифицирован на усилитель передачи -бустер, линейный усилитель и предварительный усилитель.

Усилитель-бустер устанавливается на выходе оптических передатчиков терминального оборудования или оборудования регенерации. Главная функция усилителя-бустера заключается в усилении мощности оптического излучения, вводимой в оптическое волокно, что позволяет увеличить расстояния передачи. Требования по шумовым характеристикам усилителя-бустера не высоки. Основные требования предъявляются к линейным характеристикам усиления мощности. Как правило, усилитель-бустер работает в области интервала насыщения усиления для увеличения коэффициента преобразования мощности источника накачки к мощности оптического сигнала.

Линейные усилители располагаются в пределах регенераторной секции для прямого усиления сигнала. Регенераторная секция может быть сконфигурирована с несколькими линейными усилителями согласно техническим требованиям. Линейный усилитель применяется для компенсации потерь в оптическом волокне. В данном случае требуется, чтобы EDFA имел большое усиление малых сигналов и низкий коэффициент шума.

Предварительный усилитель располагается 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, т.е. в увеличении чувствительности оптического приемника.

5.2. Расчет затухания на элементарном кабельном участке

Для определения параметров оптических усилителей и настройке их в процессе инсталляции необходимо рассчитать затухание на элементарных кабельных участках.

В данной работе расчет суммарного затухания включает затухание блока интерфейса оптических волокон FIU, служащего для ввода/вывода служебного канала на усилительных пунктах.

Произведите расчет суммарного затухания для всех ЭКУ по формуле:

$$A_{\text{ЭКУ}} = \alpha \cdot L_{\text{ЭКУ}} + a_c n_c + a_p n_p + 2 \cdot A_{\text{FIU}}, \quad (25)$$

где α - коэффициент затухания оптического волокна на длине волны λ , дБ/км; $L_{\text{ЭКУ}}$ - протяженность ЭКУ, км; a_c - затухание на сварных соединениях, дБ; n_c - количество оптических муфт; a_p - затухание на оптических разъёмных соединениях, дБ; n_p - количество оптических разъёмных соединений, дБ; A_{FIU} - затухание, вносимое блоком интерфейса оптических волокон (FIU), дБ.

Затухание сварных соединений в оптических муфтах на магистральных сетях связи РФ нормируется следующим образом:

Таблица 11 Нормы на затухание сварных соединений

Длина волны, нм	Затухание, дБ	Примечание
1550	≤ 0.1	в 100 % случаев
	≤ 0.05	в 50 % случаев

В расчетах будем использовать максимально допустимое значение затухания для всех длин волн.

Расчет количества оптических муфт на ЭКУ производится по формуле:

$$n_c = \text{int} \left(\frac{L_{\text{ЭКУ}}}{L_{\text{сд}}} \right) - 1, \quad (26)$$

где $L_{\text{сд}}$ - строительная длина оптического кабеля, км; int - округление до большего целого.

В качестве типовой протяженности строительной длины можно принимать 4-6 км.

Норма затухания разъемных соединителей составляет $a_p \leq 0.5$ дБ. Количество разъемных соединителей можно полагать равным 4 на каждом ЭКУ, что соответствует точкам подключения ВОСП-СР или оптического усилителя к кроссовому оборудованию.

Максимальное затухание, вносимое блоком интерфейса оптического волокна, в С-диапазоне составляет 1.5 дБ.

Произведите расчет затухания в оптическом тракте на трех длинах волн и занесите в таблицу 11.

Таблица 11. Затухание ЭКУ

Участок	$A_{эку}$, дБ		
ЭКУ 1			
ЭКУ 2			
...			

5.3. Выбор параметров оптического усилителя

К основным параметрам оптического усилителя, которые необходимо учитывать при проектировании, относятся:

- рабочий диапазон длин волн;
- коэффициент усиления;
- шум-фактор;
- минимальный уровень мощности на входе;
- максимальный уровень мощности на входе;
- максимальный уровень сигнала на выходе.

Также для систем спектрального уплотнения важными характеристиками являются: равномерность спектра усиления, время реакции на ввод/вывод оптических каналов.

Коэффициент усиления бустера необходимо выбрать таким образом, чтобы с учетом параметров транспондера и затухания оптического мультиплексора и прочих элементов, уровень мощность в точке начала главного оптического тракта (P_{MPI-S}) составляла $0 \div +3$ дБм.

Таким образом, требуемый коэффициент усиления бустера будет определяться формулой

$$G_{буст} = P_{MPI-S} - P_0 + A_{mux} + A_{FIU} \quad (27)$$

Мощность сигнала на выходе транспондера определите в виде:

$$P_0 = P_{\text{средн}} + 0.1 \cdot (m-n), \text{ дБм} \quad (28)$$

где $P_{\text{средн}}$ – средний уровень на выходе транспондера (определяется по параметрам выбранного транспондера).

Вносимое затухание мультиплексора/демультиплексора определяется в виде

$$A_{\text{mux}} = A_{\text{mux,средн}} + 0.1 \cdot m \quad (29)$$

где $A_{\text{mux,средн}}$ – среднее значение затухания мультиплексора/демультиплексора (см. приложение 1).

Коэффициент усиления оптического усилителя должен быть выбран таким образом, чтобы скомпенсировать затухание на ЭКУ и пассивных оптических элементах, и в тоже время, чтобы соблюдались требования к максимальному уровню на выходе усилителя и минимальному и максимальному уровню на входе следующего усилителя.

В данной работе можно выбирать значения коэффициента усиления линейного оптического усилителя приблизительно равными затуханию на ЭКУ, учитывая диапазон изменения коэффициента усиления из технических характеристик (см. Приложение 5)

Коэффициент усиления пред-усилителя на приеме следует выбирать таким образом, чтобы с учетом затухания в демультиплексоре и прочих компонентах уровень сигнала на входе транспондера был выше уровня чувствительности и не превышал уровня перегрузки.

При выборе и размещении усилителей следует контролировать, чтобы суммарная мощность на входе и выходе усилителя не превышала максимально допустимых значений (см. Приложение 5).

Суммарная мощность рассчитывается по формуле

$$P_{\text{сумм}} = P_{\text{кан}} + 10 \cdot \log_{10} N_{\text{кан}}, \text{ дБм} \quad (30)$$

где $P_{\text{кан}}$ - мощность в одном оптическом канале, дБм; $N_{\text{кан}}$ - количество оптических каналов.

На схеме связи укажите уровень сигнала в контрольных точках и требуемые значения коэффициента усиления для каждого усилителя.

6. Расчет отношения сигнал/шум на ВОЛП с оптическими усилителями

Важным фактором деградации оптического сигнала ВОЛП является шум, вносимый оптическими усилителями. Таким образом, необходимым этапом при реконструкции ВОЛП является оценка качества передачи путем контроля отношения оптический сигнал/помеха (OSNR).

Необходимо определить OSNR в точках главного оптического тракта MPI-S, MPI-R и в контрольных точках оптических усилителей R' и S' (см. рис.1).

Если шумом бустера можно пренебречь (затухание на усилительном участке намного больше коэффициента усиления бустера) для расчета можно использовать выражение:

$$OSNR = P_{MPI-S} - A_{ЭКУ} - NF - 10\lg(N_{ЭКУ}) - 10\lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{ch}), \quad (31)$$

где P_{MPI-S} - уровень выходной мощности одного канала в точке MPI-S, дБм;

$N_{эку}$ - число усилительных участков (ЭКУ);

h - постоянная Планка;

f - частота, соответствующая расчетному оптическому каналу;

Δf_{ch} - оптическая полоса канала;

$A_{эку}$ - суммарное затухание на усилительном участке (ЭКУ).

Величина Δf_{ch} выбирается таким образом, чтобы для заданной скорости передачи не происходило искажений вследствие наложения оптических спектров соседних каналов или вследствие ограничения спектра модулированного оптического сигнала. При частотном плане с шагом 100 ГГц, согласно рекомендации, канал с длиной волны 1550 нм должен характеризоваться полосой 0,1 нм, что соответствует полосе $\Delta f_{ch} \approx 12,5$ ГГц. В этом случае:

$$10\lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{CH}) = 10\lg(6,628 \cdot 10^{-34} \cdot 193,1 \cdot 12,5 \cdot 10^9 \cdot 10^3) \approx -58 \text{ дБ}. \quad (32)$$

В расчетах в качестве $A_{эку}$ выбирайте максимальные значения для соответствующих длин волн из таблицы 11, а шум-фактор усилителя $NF = 5.5$ дБ.

Таким образом, произведите расчеты OSNR на трех длинах волн и представьте зависимость изменения OSNR на РУ ВОЛП.

Отношения оптических сигнал/шум в каждом оптическом канале в точках MPI-S и MPI-R для различных кодов применения в зависимости от максимального числа ЭКУ (x) должны быть не менее, дБ:

$$19 + x + 10 \lg x - \text{в точке MPI-S}; \quad (33)$$

$$19 + x - k + 10 \lg \frac{x}{k+1} - \text{в точке MPI-R}. \quad (34)$$

Примечание: k – порядковый номер линейного ОУ.

Сравните полученные значения с нормами для точки MPI-R. Сделайте вывод о качестве сигнала.

7. Выбор формата представления передаваемой двоичной информации

Выбор оптимального формата модуляции для высокоскоростных ВОСП является предметом особого внимания. Данный факт объясняется тем, что корректный выбор модуляционного формата представления двоичных данных в некоторых случаях может обеспечить существенное преимущество, выраженное в увеличении OSNR на приеме.

Примечание. Модуляция - изменение одного или нескольких параметров несущего колебания в соответствии с передаваемым сообщением. В дискретных системах связи канальный сигнал принимает по информационному параметру лишь дискретный ряд значений. В этом случае обычно говорят не о модуляции, а о манипуляции (дискретной модуляции) несущей.

Основными форматами представления двоичных данных в ВОСП являются амплитудная манипуляция – ASK (Amplitude Shift Keying), фазовая манипуляция – PSK (Phase Shift Keying), манипуляция по состоянию поляризации – DP (Dual Polarization state phase modulation), а также их комбинации. Сравнительная характеристика некоторых форматов манипуляции представлена в таблице 12.

Таблица 12. Сравнение форматов манипуляции

	NRZ-DPSK	RZ-DPSK	DP-QPSK	DQPSK
OSNR (в сравнении с NRZ)	+ 3 дБ	+ 4 дБ	+ 3 дБ	+ 3,5 дБ
Поддержка сетки 50 ГГц	-	-	+	+
Порог влияния ПМД	2,5 пс	3 пс	12 пс	8 пс

8. Выбор кодера упреждающей коррекции ошибок

Увеличить OSNR возможно за счет расширения оптического диапазона ВОСП, в частности применением упреждающей коррекции ошибок (FEC - Forward Error Correction), для которой применяются коды, исправляющие ошибки (ECC - Error-Correcting Code).

Использование ECC усложняет оборудование ВОЛП, причем пропорционально числу оптических несущих для систем WDM (Wavelength Division Multiplexing). Кроме того, возникает дополнительная кодовая избыточность, которая увеличивается с ростом выигрыша в OSNR и может достигать 20-25%. Нарращивание корректирующей способности кодов возможно путем каскадного их использования. При этом в качестве внутреннего кода выбирается, как правило, двоичный блочный код, например код Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), а в качестве внешнего - недвоичный код RS.

В качестве стандартного корректирующего кода в рекомендации G.709 используется код Рида-Соломона (RS(255, 239)) с избыточностью 7%.

Таблица 13. Коды, исправляющие ошибки

	RS (255,239)	RSxRS	LDPC (G.975.1 I.6)	BCHxBCH (G.975.1 I.7)	BCHxBCH (G.975.1 I.3)	SD RS Hamm'g (G.975.1 I.5)
NCG, дБ	6.2	7.1	8.1	8.2	9	9.5

Примечание. NCG - чистый выигрыш от кодирования.

RS - код Рида-Соломона.

LDPC - код с малой плотностью проверок на чётность.

BCH - код Боуза-Чоудхури-Хоквингема.

SD RS Hamm'g – каскадный код Рида-Соломона и Хемминга

По результатам сравнения нормативного и расчетного (п. 6) значений OSNR, учитывая исходные данные к модернизации ВОЛП, примите и обоснуйте решение о необходимости использования специального формата манипуляции и/ или кодера упреждающей коррекции ошибок.

9. Расчет накопленной поляризационной модовой дисперсии

На ВОЛП с компенсацией хроматической дисперсии при скорости передачи 10 Гбит/с и выше ограничивающим фактором может оказаться поляризационная модовая дисперсия (ПМД).

Явление ПМД обусловлено тем фактом, что вследствие двулучепреломления, вызванного внутренними неоднородностями и внешними воздействиям, основную моду распространения HE_{11} можно представить в виде двух линейно поляризованных мод с перпендикулярными друг другу поляризациями. Вследствие различия показателей преломления для каждого состояния поляризации линейно поляризованные моды будут распространяться в ОВ с различными групповыми скоростями. Это приводит к тому, что импульсы с двумя ортогональными поляризациями приходят к приемнику с некоторой задержкой, далее на фотоприемнике выводится мощность, соответствующая сумме двух поляризаций. В итоге длительность импульса уширяется и наблюдается явление межсимвольной интерференции и увеличение коэффициента ошибок BER.

На регенерационном участке основной вклад в ПМД будут вносить телекоммуникационное волокно и модули компенсации дисперсии.

Рассчитайте вклад в суммарное ПМД, которое вносит телекоммуникационное оптическое волокно:

$$PMD_{OB} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \sigma_{PMD,i} \cdot \sqrt{L_{ЭКУ,i}}}. \quad (35)$$

Рассчитайте вклад в суммарное ПМД, которое вносят модули компенсации дисперсии:

$$PMD_{DC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{DCM}} PMD_{DCM,i}^2}, \quad (36)$$

где PMD_{DCM} – поляризационная модовая дисперсия модуля компенсации дисперсии, определяемая из таблицы 8;

N_{DCM} – количество установленных модулей компенсации дисперсии.

Расчет суммарной накопленной поляризационной модовой дисперсии на регенерационном участке производится по формуле:

$$PMD_{PV} = \sqrt{PMD_{OB}^2 + PMD_{DC}^2}. \quad (37)$$

Допустимое значение ПМД, накоплено на регенерационном участке составляет 10% от длительности битового интервала. Рассчитайте максимально-допустимое значения для своей скорости передачи по формуле:

$$PMD_{\max} = \frac{0.1}{B}, \quad (38)$$

где B – скорость передачи, бит/с.

При использовании 40G транспондеров с фазовыми форматами модуляции максимально-допустимое значение PMD_{\max} определите по таблице технических характеристик.

Сравните максимально-допустимое значение ПМД с результатами расчета PMD_{PY} и сделайте соответствующие выводы.

На основании проведенных расчетов и исследовании параметров работы ВОЛП сформулируйте выводы о проделанной работе и работоспособности систем передачи.

Список литературы

1. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. – 251с.
2. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. С.А.Дмитриева, Н.Н.Слепова. – М.: Connect, 2000.
3. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. – М.: Р и С, 2002. – 312 с.
4. Андреев В.А., Дашков М.В. Рамановские усилители на волоконно— оптических линиях передачи. – М.: Ириас, 2008.
5. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети, Москва, Экотрендз, 1998
6. А.С. Курков, О.Е. Наний Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave Russian Edition, №1, 2003, 14-19
7. Р.Р. Убайдуллаев Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian Edition, №1, 2003, 22-29
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во Syrus Systems, 1999.
9. Скляр О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 240с.
10. ГОСТ 26599-85 Системы передачи волоконно-оптические. Термины и определения.
11. ОСТ 45.104-97 Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Классификация и основные параметры.
12. ОСТ 45.178-2001 Системы передачи с оптическими усилителями и спектральным уплотнением. Стыки оптические. Классификация и основные параметры.
13. ОСТ 45.190-2001 Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения.
14. Н.Н. Слепов. Системы SDH уровня STM-1024 // Первая миля, №3, 2009, 24-30.
15. Н.Н. Слепов. Оптоволоконные системы дальней связи. Перспективы развития // Электроника НТБ. Выпуск #6/2005, 70-75.