

**5308**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

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

Методические указания к курсовому проекту

Рязань 2019

УДК 621.396

Проектирование волоконно-оптической линии передачи с использованием аппаратуры спектрального уплотнения: методические указания к курсовому проекту / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.А. Лисничук, И.В. Косткин. Рязань, 2019. 24 с.

Проанализированы условия и критерии выбора и размещения компенсаторов хроматической дисперсии, учет влияния поляризационной модовой дисперсии и нелинейных эффектов, основные способы определения формата представления передаваемой двоичной информации, выбор параметров и расстановка оптических усилителей, а также выбор кодера коррекции ошибок.

Материал соответствует программам дисциплин подготовки бакалавров и магистров техники и технологии по направлениям 11.03.02 и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Табл. 14. Ил. 1. Библиогр.: 11 назв.

*Волоконно-оптические системы передачи, спектральное уплотнение, компенсация дисперсии, модернизация оптических систем передачи*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиоуправления и связи (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. С.Н. Кириллов)

Проектирование волоконно-оптической линии передачи с использованием аппаратуры спектрального уплотнения

Составители: Л и с н и ч у к Александр Александрович  
К о с т к и н Иван Вячеславович

Редактор М.Е. Цветкова  
Корректор С. В. Макушина

Подписано в печать 05.04.19. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

## Оглавление

Введение .....	2
1. Постановка задачи .....	3
2. Структурная схема регенерационного участка ВОЛП .....	9
3. Расчет модуля компенсации хроматической дисперсии .....	10
4. Выбор и размещение модулей компенсации дисперсии .....	13
5. Выбор и размещение оптических усилителей .....	15
6. Расчет отношения сигнал/шум на ВОЛП с оптическими усилителями .....	19
7. Расчет накопленной поляризационной модовой дисперсии .....	20
8. Выбор формата представления передаваемой двоичной информации .....	21
9. Выбор кодера упреждающей коррекции ошибок .....	22
Библиографический список .....	24

## **Введение**

Адекватным способом для расширения пропускной способности волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) является технология спектрального уплотнения (wavelength division multiplexing – WDM). Работоспособность систем на основе WDM основана на передаче по оптическому волокну нескольких потоков данных на различных длинах волн (т.е. на отдельных оптических каналах). На практике при широкополосной передаче данных спектральное уплотнение является наиболее доступной и экономически эффективной технологией как при модернизации существующих, так и при проектировании перспективных ВОЛП. Кроме того, рост пропускной способности целесообразно обеспечивать также с помощью применения высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Для магистральных ВОЛП, как правило, стандартная скорость в оптическом канале составляет порядка 10 Гбит/с, а на отдельных участках – 40 Гбит/с и более.

В отличие от применяемых ранее одноканальных систем внедрение высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов (ВОСП-СР) делает необходимым рассмотрение следующего комплекса вопросов: выбора формата представления передаваемой двоичной информации, выбора и размещения компенсаторов хроматической дисперсии, выбора параметров и расстановки оптических усилителей, учета влияния поляризационной модовой дисперсии и нелинейных эффектов, а также выбора кодера упреждающей коррекции ошибок.

Целью данной работы является проектирование отдельных частей волоконно-оптической линии передачи с использованием аппаратуры спектрального уплотнения.

### **Общие указания по выполнению курсового проекта**

Курсовой проект должен содержать текстовую, расчетную и графическую части, выполняемые на листах формата А4. Графические материалы размещаются в соответствующих разделах пояснительной записки (ПЗ). Пояснительная записка, кроме разделов, указанных в задании, должна содержать титульный лист, листы «Содержание», «Введение», «Заключение», «Библиография».

Оформление расчетов производится в последовательности:

- наименование, условное обозначение, единица измерения рассчитываемой физической величины;
- запись полной расчетной формулы с указанием порядкового номера;

- указание наименований, численных значений и единиц измерения исходных данных;
- подстановка данных в формулу, расчет и ответ с указанием единицы измерения.

В конце всех расчетов дается заключение в соответствии с целью расчетов.

Общий объем пояснительной записки не должен превышать 20 - 25 листов.

При оформлении пояснительной записки следует использовать тип шрифта Times New Roman, кегль 14, абзацный отступ 15 мм, межстрочный интервал – 1, названия разделов оформлять заглавными буквами, выравнивание посередине страницы, раздел начинать с новой страницы. Нумерацию формул вести по разделам: 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2 и т.д. Формулы должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation или MathType. Размер формул должен соответствовать размеру текста.

Порядок следования листов в проекте: титульный лист пояснительной записки, лист содержания, листы ПЗ, лист заключения, лист библиографии.

Нумерация страниц ведется с титульного листа ПЗ, номер на нем не ставится.

## 1. Постановка задачи

1.1. Рассматриваемый участок ВОЛП состоит из 5 элементарных кабельных участков (ЭКУ).

1.2. Протяженность ЭКУ  $L_{ЭКУ}$  определяется из табл. 1, где  $kmn$  – последние 3 цифры номера зачетной книжки.

**Таблица 1**

**Расчет протяженности ЭКУ**

№ ЭКУ	1	2	3	4	5
$L_{ЭКУ}$ , км	$121-3*k+n$	$90+4*m-3*n$	$141-m+k$	$99-m-n+k$	$112+m-2*n$

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

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

где  $(kmn) \bmod 4$  обозначает остаток от деления нацело  $kmn$  на 4; тип ОВ см. в табл. 2.

Например, если последние три цифры зачетной книжки 123, то  $123:4 = 30,75$ . Следовательно,  $(123) \bmod 4 = 123-30*4 = 3$ .

**Таблица 2**

**Выбор типа ОВ**

$(kmn) \bmod 4$	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. Необходимо повысить пропускную способность существующей ВОЛП за счет увеличения скорости передачи в оптическом канале и использования технологии спектрального уплотнения.

В данной работе рассматривается функционирование ВОЛП при двух разных скоростях передачи ( $B$ , Гбит/с) в оптическом канале (см. табл. 3).

**Таблица 3**

**Скорости передачи**

$B$ , Гбит/с	Уровень
10	STM-64
40	STM-256

1.5. Количество оптических каналов определяется по формуле:

$$N_{ch} = 2^{2+(kmn) \bmod 4} . \quad (2)$$

Рассчитайте суммарную пропускную способность системы спектрального уплотнения (для двух скоростей, см. табл. 3) по формуле:

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

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:

$$f_{ch,i} = 193,10 \text{ ТГц} + \Delta f \left( i - \frac{N_{ch}}{2} \right), \quad (4)$$

где  $f_{ch,i}$  – рабочая частота  $i$ -го оптического канала;  $i$  – номер канала;  $\Delta f$  – спектральный интервал между каналами.

*Примечание. Соблюдайте размерности! ТГц = 10<sup>12</sup> Гц, ГГц = 10<sup>9</sup> Гц.*

Спектральный интервал между каналами определяется из табл. 4.

**Таблица 4**

**Спектральный интервал между каналами**

Условие	$\Delta f$ , ГГц
$m$ – четное	100
$m$ – нечетное	50

Для выполнения расчетов переведите частоту в длину волны по формуле:

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

где  $c$  – скорость света в вакууме, равная **299792458** м/с,  $f_{ch,i}$  – рабочая частота  $i$ -го оптического канала в Гц.

*Примечание. В формулу подставлять значения в указанных размерностях. Для проверки – длина волны среднего канала должна быть порядка 1552,52 нм. Округление результата производите до второго знака после запятой.*

Полученные значения занесите в табл. 5.

**Таблица 5**

**Рабочие длины волн оптических каналов**

Номер канала	Длина волны канала $\lambda_{ch,i}$ , нм
1	
2	
...	....

1.7. Негативные факторы, возникающие в ВОЛС.

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

**Для ОВ рек. G.652. А, D:**

- на длине волны 1550 нм коэффициент затухания  $\alpha$  составил:

$$\alpha(1550 \text{ нм}) = 0,19 + 0,01 [(kmm) \bmod 4], \text{ дБ/км.} \quad (6)$$

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  $\lambda$  – длина волны, нм.

**Для ОВ рек. G.655. А, D:**

- на длине волны 1550 нм коэффициент затухания  $\alpha$  составил

$$\alpha(1550 \text{ нм}) = 0,2 + 0,01 [(kmm) \bmod 4], \text{ дБ/км.}$$

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

$$\alpha(\lambda) = \alpha(1550 \text{ нм}) + \frac{0,025}{400} \cdot (\lambda - 1550)^2, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны, нм.

Произведите расчет для трех длин волн: двух крайних и средней. Постройте график зависимости коэффициента затухания от длины волны для частот своих каналов. Сделайте выводы.

1.7.2. В технике оптико-волоконной связи под дисперсией понимается изменение длительности импульса при прохождении его по волокну. Изменение это обычно сводится к уширению импульса. Негативное воздействие дисперсии заключается в том, что происходит уменьшение реализуемой скорости передачи по ВОЛС за счет возникновения межсимвольной интерференции.

Различают модовую дисперсию, которая обусловлена большим количеством мод в оптических волокнах; хроматическую дисперсию, связанную с некогерентностью источников излучения, реально работающих в определенном спектре длин волн; а также



поляризационную дисперсию, возникающую при распространении поляризованной световой волны вдоль оптического волокна.

В одномодовых оптических волокнах модовая дисперсия отсутствует и увеличение длительности импульса определяется хроматической дисперсией, которая, в свою очередь, подразделяется на материальную и волноводную.

Материальной дисперсией называют явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны света. Волноводная дисперсия определяется зависимостью коэффициента фазы от частоты.

При измерении хроматической дисперсии были получены следующие результаты.

**Для ОВ рек. G.652. А, D:**

- длина волны нулевой дисперсии:

$$\lambda_0 = 1300 - k + m + n, \text{ нм}; \quad (9)$$

- наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии:

$$S_0 = 0,085 + 0,001 \cdot (k + m - n), \text{ пс}/(\text{нм}^2 \text{ км}). \quad (10)$$

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

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}), \quad (11)$$

где  $S_0$  – наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии, пс/(нм<sup>2</sup> км);  $\lambda_0$  – точка нулевой дисперсии, нм.

**Для ОВ рек. G.655. А, D** параметры дисперсионной характеристики определяются по табл. 6.

**Таблица 6**

**Дисперсионные параметры ОВ рек. G.655. А, D**

Условие	Диапазон длин волн	$D$ , пс/(нм км)	$S$ (1550 нм), пс/(нм <sup>2</sup> км)
$n$ – четное	$\lambda \in (1530-1565)$ нм	2,0 – 4,5	0,07
	$\lambda \in (1565-1625)$ нм	4,5 – 8,5	
$n$ – нечетное	$\lambda \in (1530-1565)$ нм	5,5 – 7,5	0,058
	$\lambda \in (1565-1625)$ нм	7,5 – 11,0	

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

$$D(\lambda) = \left( \frac{D(1565\text{нм}) - D(1530\text{нм})}{35} (\lambda - 1565\text{нм}) \right) + D(1565\text{нм}) \quad (12)$$

при рабочей длине волны **до 1565 нм**;

$$D(\lambda) = \left( \frac{D(1625\text{нм}) - D(1565\text{нм})}{60} (\lambda - 1625\text{нм}) \right) + D(1625\text{нм}) \quad (13)$$

при рабочей длине волны **от 1565 нм и до 1625 нм**.

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

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

### 1.7.3. Влияние поляризационной дисперсии.

Световая волна с точки зрения волновой теории представляет собой постоянно изменяющиеся магнитное и электрическое поля, вектор которых расположен перпендикулярно к распространению электромагнитной (световой) волны. Примером световой волны может служить естественный свет, у которого направление электрического вектора изменяется случайным образом. Если излучение монохроматическое и векторы колеблются с некоторой постоянной частотой, то их можно представить в виде суммы двух взаимно перпендикулярных составляющих. Идеальное оптоволокно является изотропной средой, в которой электромагнитные свойства являются одинаковыми во всех направлениях, например показатели преломления. Среда с различными показателями преломления в двух ортогональных осях называется двулучепреломляющей. При этом волокно в данном случае по-прежнему остается одномодовым, поскольку две ортогонально поляризованные моды имеют одну и ту же постоянную распространения. Но это справедливо лишь для идеального оптического волокна. В реальном оптическом волокне две ортогонально поляризованные моды имеют неидентичные постоянные распространения, вследствие чего появляется временная задержка и происходит уширение оптического импульса.

При измерении поляризационной дисперсии были получены следующие результаты:

**Для ОВ рек. G.652.A и G.655.A**

Номер	1	2	3	4	5
-------	---	---	---	---	---

ЭКУ					
$D_{PMD},$ $n c / \sqrt{KM}$	$0,3+0,03*m$	$0,2 + 0,02*n$	$0,3+ 0,02*k$	$0,5- 0,02*m$	$0,5 - 0,02*k$

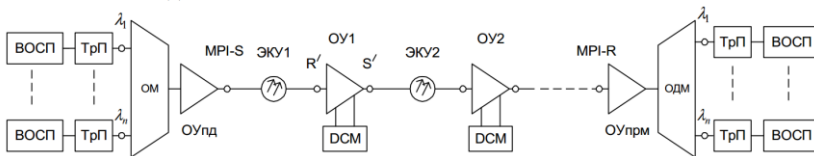
Для ОВ рек. G.652.D и G.655.D

Номер ЭКУ	1	2	3	4	5
$D_{PMD},$ $n c / \sqrt{KM}$	$0,1+ 0,01*k$	$0,2 - 0,01*n$	$0,05+0,01*n$	$0,2 - 0,01*k$	$0,08+0,01*n$

Рассчитайте значения коэффициента ПМД на ЭКУ.

## 2. Структурная схема регенерационного участка ВОЛП

Рассмотрим простую схему организации связи “точка-точка”. При этом на оконечных пунктах размещается оборудование ВОСП и аппаратура спектрального уплотнения, включающая транспондеры (ТрП), оптические мультиплексоры (ОМ) и демультиплексоры (ОДМ). На рисунке приведена структурная схема регенерационного участка ВОЛП с аппаратурой спектрального уплотнения для одного направления.



Организация связи производится по двум волокнам – прием и передача по отдельному волокну. В обратном направлении схема будет иметь аналогичный вид.

Основные компоненты структурной схемы регенерационного участка ВОЛП:

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи STM-64 (Synchronous Transport Module) 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 сигналов на различных длинах волн в групповой поток;

ОУпд – оптический усилитель передачи (бустер, booster), 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 – (Dispersion Compensation Modules) модуль 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;

MPI-S – (Source Main Path Interface reference point) интерфейс многоканального тракта у передатчика (источника);

MPI-R – (Receive Main Path Interface reference point) интерфейс многоканального тракта у приемника.

Начертите схему (в соответствии с требованиями ГОСТ) регенерационного участка для исходных данных своего варианта. Укажите протяженности ЭКУ, суммарную протяженность регенерационного участка и номера рабочих каналов.

### **3. Расчет модуля компенсации хроматической дисперсии**

#### **3.1. Выбор типа волокна компенсации дисперсии.**

В настоящее время наиболее широко для компенсации хроматической дисперсии при модернизации ВОЛП используется специальное компенсирующее волокно (Dispersion Compensating Fibers – DCF), обладающее значительной отрицательной дисперсией и включаемое в оптический тракт в виде модулей. Модуль компенсации хроматической дисперсии 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 (НУП), а также на оконечных пунктах (ОП).

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 (марки) 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

$$\min_i \left| RDS_{DCF,i} - RDS_{TF} \right|, \quad i \in \overline{1, 6}, \quad (14)$$

где  $i$  определяет тип волокна DCF в соответствии с порядковым номером строки табл. 7;  $RDS_{DCF}$ ,  $RDS_{TF}$ , 1/нм – соответственно относительный наклон дисперсионной характеристики компенсирующего и телекоммуникационного волокон.

$$RDS = \frac{S}{D}, \quad (15)$$

где  $S$  – наклон дисперсионной кривой, пс/(нм<sup>2</sup> км);  $D$  – коэффициент дисперсии, пс/(нм км).

Произведите расчет  $RDS_{TF}$  телекоммуникационного волокна для средней длины волны из рабочего диапазона по формуле (15), принимая значение  $S = S_0$ , определенное по формуле (10), либо из табл. 6 и  $D$ , рассчитанное для средней длины волны каналов своего варианта.

Определите  $RDS_{DCF}$  для образцов волокна компенсации и выберите марку DCF из табл. 7, наиболее подходящую по критерию (14).

**Таблица 7**  
**Параметры волокон компенсации дисперсии**

Марка DCF	$D_{DCF} (1550 \text{ нм}),$ $пс / (\text{нм} \cdot \text{км})$	$S_{DCF},$ $пс / (\text{нм}^2 \cdot \text{км})$	$\alpha_{DCF},$ $\text{дБ} / \text{км}$	$D_{PMD DCF},$ $пс / \sqrt{\text{км}}$	$A_{eff},$ $\text{мкм}^2$
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

Обоснуйте выбор типа волокна для DCM.

### 3.2. Расчет параметров модуля компенсации дисперсии.

Требуемая длина DCF определяется по формуле:

$$L_{DCF} = -\frac{D_{TF}}{D_{DCF}} \cdot L_{TF}, \quad (16)$$

где  $D_{TF}$  – коэффициент хроматической дисперсии телекоммуникационного волокна,  $D_{DCF}$  – коэффициент хроматической дисперсии компенсирующего волокна,  $L_{TF}$  – длина телекоммуникационного волокна (из типового набора, см. ниже), км.

Расчет  $L_{DCF}$  производите для средней длины волны.

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

- для ОВ рек. G.652  $L_{TF} = 60; 80; 100; 120 \text{ км};$
- для ОВ рек. G.655  $L_{TF} = 80; 140; 200; 240 \text{ км}.$

*Не стоит путать набор стандартных длин  $L_{TF}$ , для которых разработаны модули компенсации и длины самих волокон компенсации дисперсии  $L_{DCF}$ , рассчитываемых по формуле (16).*

Для каждого модуля DCM рассчитайте величину дисперсии по формуле:

$$\sigma_{DCM} = D_{DCF} L_{DCF}. \quad (17)$$

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:

$$D_{DCF}(\lambda) = D_{DCF}(1550) + S_{DCF} \cdot (\lambda - 1550), \quad (18)$$

где  $\lambda$  – 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 / (нм<sup>2</sup> × км).

Для расчета суммарного затухания модуля компенсации:

$$A_{DCM} = \alpha_{DCF} \cdot L_{DCF} + 2 \cdot \alpha_{spl} + 2 \cdot \alpha_{com}, \quad (19)$$

где  $\alpha_{DCF}$  – коэффициент затухания DCF, дБ/км;  $L_{DCF}$  – длина DCF, км;  $\alpha_{spl}$  – затухание на сварном соединении DCF, дБ;  $\alpha_{com}$  – затухание на разъёмном соединении, дБ.

В расчетах следует принимать  $\alpha_{com} = 0,5$  дБ и  $\alpha_{spl} = 0,3$  дБ.

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

$$PMD_{DCM} = D_{PMD} \sqrt{L_{DCF}}, \quad \text{пс}. \quad (20)$$

Результаты расчетов сведите в табл. 8.

**Таблица 8**

**Параметры модулей компенсации дисперсии**

	DCM-A	DCM-B	DCM-C	DCM-D
$L_{TF}$ , км				
$\sigma_{DCM}$ , 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 то же время не вызвать увеличения нелинейных эффектов.

Произведите выбор и размещение модулей DCM в зависимости от протяженности участков компенсации. Как правило, в промежуточных усилительных пунктах размещаются DCM с номиналами, наиболее близкими к длине ЭКУ, т.е. в первом приближении количество DCM соответствует числу ЭКУ, а тип DCM выбирается по следующему критерию:

$$\min_j |L_{\text{ЭКУ},i} - L_{\text{TF},j}|; \quad i = \overline{1,5}; \quad j \in \overline{1,4}. \quad (21)$$

4.2. Расчет остаточной некомпенсированной дисперсии произведите по формуле:

$$\sigma_{\text{RES}} = \sum_{i=1}^5 (D_{\text{TF}} L_{\text{ЭКУ},i} + \sigma_{\text{DCM},i}). \quad (22)$$

Расчет производите для двух крайних рабочих длин волн и средней длины волны. После расчета проверьте, выполняются ли условия:

- для 10 Гбит/с  $|\sigma_{\text{RES}}| < 1000$  пс/нм;
- для 40 Гбит/с  $|\sigma_{\text{RES}}| < 62,5$  пс/нм.

Если остаточная дисперсия превышает максимально допустимые значения, скорректируйте выбор номиналов и/или количество и типы модулей компенсации дисперсии. При необходимости разработайте специальный модуль DCM, т.е. по значению некомпенсированной дисперсии рассчитайте требуемую длину волокна DCF.

Занесите выбранные типы модулей в соответствии со схемой их размещения в табл. 9. Здесь ОП – оконечный пункт, НУП – необслуживаемый усилительный пункт, СП – специальный пункт, на котором размещается при необходимости специальный модуль DCM.

**Таблица 9**

**Размещение модулей компенсации дисперсии**

Пункт	Тип DCM
ОП-1	



НУП-1	
СП	

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

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^j (D_{TF} L_{\text{ЭКУ},i} + \sigma_{DCM,i}), \quad (23)$$

где  $j$  – номер ЭКУ.

Результаты сведите в табл. 10 и постройте график зависимости накопленной дисперсии от длины регенерационного участка. Сделайте выводы.

**Таблица 10**

**Изменение дисперсии на регенерационном участке**

Участок	$\sigma_{RES}, \text{ пс} / \text{ нм}$		
ЭКУ 1			
ЭКУ 1 + DCM 1			
ЭКУ 1 + DCM 1 + ЭКУ 2			
...			

## 5. Выбор и размещение оптических усилителей

### 5.1. Общие положения

Оптические усилители (ОУ) являются важнейшим элементом экономически эффективных ВОЛП с ВОСП-СР и сетей на их основе. К основным параметрам ОУ относятся как общие для всех типов усилителей характеристики: коэффициент усиления, уровень (коэффициент) шума, динамический диапазон, амплитудно-волновая характеристика (аналог амплитудно-фазовой характеристики), так и специфические, свойственные только ОУ: коэффициент усиления среды, мощность насыщения, чувствительность к поляризации сигнала.

Принцип действия ОУ коротко можно пояснить следующим образом. Пусть существует некая активная среда, имеющая два энергетических состояния  $E_1$  и  $E_2$ , причем  $E_1 < E_2$ . То есть уровень  $E_2$  является возбужденным состоянием по отношению к уровню  $E_1$ . В равновесных условиях число  $N$  рабочих частиц (электронов, ионов или молекул) распределено по статистике Больцмана так, что  $N_1 > N_2$ . В этом случае, если в такую среду поступает фотон, то он с большой вероятностью будет поглощен этой средой. То есть усиления нет, но существует некоторая вероятность эмиссии (испускания фотона) за счет спонтанного перехода электрона с верхнего возбужденного уровня на нижний релаксационный уровень.

Усиление становится возможным, если реализовать инверсию населенностей уровней ( $N_1 < N_2$ ). Инверсия населенностей уровней создается с помощью системы энергетической накачки. В качестве накачки используют инжекцию электронов или излучения лазера соответствующей длины волны.

В результате накачки создается необходимая инверсная населенность, и активная среда становится способной при попадании в нее фотона оптического сигнала генерировать вторичные фотоны (на той же длине волны и с тем же направлением распространения) с некоторым коэффициентом размножения. Другими словами, имеет место усиление оптического сигнала за счет возбуждаемой эмиссии.

Важно то, что усиление носит распределенный характер. Это обусловлено генерацией фотонов в течение всего времени прохождения усиливаемого оптического сигнала через активную среду, имеющую конечную длину.

В настоящее время наиболее широко применяются оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA). EDFA обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов без их преобразования в электрические, их рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует окну прозрачности кварцевого оптического волокна и основным рабочим диапазонам ВОСП-СР (С и L диапазоны). Оптические усилители работают независимо от протокола сигнала или метода модуляции оптического сигнала. Кроме EDFA усилителей, в сетях связи также получают распространение 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 увеличении мощности оптического излучения, вводимой в оптическое волокно, что позволяет повысить расстояние передачи. Требования по шумовым характеристикам усилителя-бустера невысоки. Основные требования предъявляются к линейным характеристикам усиления мощности. Как правило, данное устройство 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 это устройство имело большое усиление малых сигналов и низкий коэффициент шума.

Предварительный усилитель располагается перед оптическим приемником терминального оборудования. Основная функция данного устройства заключается в усилении малых по мощности сигналов, ослабленных во время передачи по каналу.

## 5.2. Расчет затухания на элементарном кабельном участке

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

Произведите расчет суммарного затухания для всех ЭКУ по формуле:

$$A_{\text{эку}}(\lambda) = a(\lambda)L_{\text{эку}} + a_c n_c + a_p n_p + 2 \cdot A_{\text{фиу}}, \quad (24)$$

где  $a(\lambda)$  – коэффициент затухания оптического волокна на длине волны  $\lambda$ , 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;  $A_{\text{фиу}}$  – затухание, вносимое блоком интерфейса оптических волокон, дБ.

Затухание сварных соединений в оптических муфтах на магистральных сетях связи РФ нормируется согласно табл. 11.

**Таблица 11**

**Нормы на затухание сварных соединений**

Длина волны, нм	Затухание, дБ	Примечание
1550	$\leq 0,1$	в 100 % случаев
	$\leq 0,05$	в 50 % случаев

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

Расчет количества оптических муфт на ЭКУ производится по формуле:

$$n_c = \text{int} \left( \frac{L_{\text{ЭКУ}}}{L_{\text{сд}}} \right) - 1, \quad (25)$$

где  $L_{\text{сд}}$  – строительная длина кабеля, км,  $\text{int}(\dots)$  – округление до большего целого числа. В качестве типовой протяженности строительной длины можно принимать длины 4 - 6 км.

Норма затухания разъемных соединителей составляет  $a_p < 0,5$  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 максимального затухания в оптическом тракте на трех длинах волн и занесите в табл. 12.

**Таблица 12**

**Затухание ЭКУ**

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

Сделайте выводы.

**5.3. Выбор параметров оптического усилителя**

Коэффициент усиления оптического усилителя должен быть выбран таким образом, чтобы скомпенсировать затухание на ЭКУ, и в

то же время, чтобы соблюдались требования к максимальному уровню на выходе усилителя и минимальному и максимальному уровням на входе следующего усилителя.

В данной работе можно полагать значения коэффициента усиления приблизительно равными затуханию на ЭКУ.

## **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 модернизации ВОЛП является оценка качества передачи путем контроля оптического отношения сигнала к шуму (Optical Signal-To-Noise – OSNR). Если шумом бустера можно пренебречь (затухание на усилительном участке намного больше коэффициента усиления бустера), то для расчета можно использовать выражение:

$$OSNR = P_{ch} - A_{ЭКУ} - NF - 10lg(N_{ЭКУ}) - 10lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{ch} \cdot 10^3), \quad (26)$$

где  $P_{ch}$  – 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;  $\Delta f_{ch}$  – оптическая полоса канала;  $A_{ЭКУ}$  – суммарное затухание на усилительном участке (ЭКУ);  $NF$  – шум-фактор усилителя.

Величина  $\Delta f_{ch}$  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:

$$\begin{aligned} 10lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{ch} \cdot 10^3) &= \\ &= 10lg(6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 193,4 \cdot 10^{12} \cdot 12,5 \cdot 10^9 \cdot 10^3) \approx -58 \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (27)$$

Данное значение возможно использовать для приближенного расчета и на остальных частотах каналов.

В расчетах в качестве  $A_{эку}$  выбирайте максимальные значения для соответствующих длин волн из табл. 12, а шум-фактор усилителя  $NF = 5,5$  дБ. Мощность оптического канала для расчетов определите в виде

$$P_{ch} = 0,5 \cdot n, \text{ дБм}, \quad (28)$$

где  $n$  – последняя цифра зачетки.

Таким образом, произведите расчеты на трех длинах волн для самого худшего случая – с максимальным значением затухания на ЭКУ. Сделайте вывод о качестве сигнала и необходимости дополнительного усиления.

## 7. 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 к 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 (Bit error rate).

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:

$$PMD_{OB} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (D_{PMD,i} \cdot \sqrt{L_{ЭКУ,i}})^2}. \quad (29)$$

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

$$PMD_{DC} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{DCM}} PMD_{DCM,i}^2}, \quad (30)$$

где  $PMD_{DCM}$  – поляризационная модовая дисперсия модуля компенсации дисперсии, определяемая из табл. 8;  $N_{DCM}$  – количество установленных модулей компенсации дисперсии.

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

$$PMD_{PY} = \sqrt{PMD_{OB}^2 + PMD_{DC}^2}. \quad (31)$$

Максимально допустимое значение ПМД, накопленное на регенерационном участке, рассчитайте для каждой скорости передачи по формуле:

$$PMD_{\max} = \frac{140}{B}, \text{ пс}, \quad (32)$$

где  $B$  – скорость передачи, Гбит/с.

Сравните с результатами расчета  $PMD_{PY}$  и сделайте выводы о работоспособности систем передачи. В случае  $PMD_{PY} > PMD_{\max}$  предложите пути снижения действия ПМД на ВОСП.

## 8. 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).*

Основными форматами представления двоичных данных в ВОЛП 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 табл. 13.

**Таблица 13**

**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

Принимая во внимание пп. 6 и 7, сделайте вывод о целесообразности применения рассмотренных форматов модуляции (см. табл. 13).

**9. Выбор кодера упреждающей коррекции ошибок**

Увеличить OSNR возможно применением упреждающей коррекции ошибок (FEC – Forward Error Correction), для которой применяются коды, исправляющие ошибки (ECC – Error-Correcting Code).

Использование кодов ECC усложняет оборудование ВОЛП, причем пропорционально числу оптических несущих для систем WDM. 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 Рида – Соломона (RS).

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

Показатели качества некоторых помехоустойчивых кодов приведены в табл. 14.

**Таблица 14**

**Коды, исправляющие ошибки**

	RS (255,239)	RS x RS	LDPC (G.975.1 L6)	BCH x BCH (G.975.1	BCH x BCH (G.975.1	SD RS Hamm'g (G.975.1



				I.7)	I.3)	I.5)
<i>NCG</i> , <i>дБ</i>	6,2	7,1	8,1	8,2	9,0	9,5

*Примечание*

*NCG* – чистый выигрыш от кодирования.

*RS* – код Рида – Соломона.

*LDPC* – код с малой плотностью проверок на чётность.

*VCH* – код Боуза – Чоудхури – Хоквингема.

*SD RS Hamt 'g* – каскадный код Рида – Соломона и Хемминга.

В данной работе для обеспечения требуемого коэффициента ошибок BER в точке принятия решения значение OSNR на входе оптического приемника должно быть не хуже 12,8 дБ. Принимая во внимание пп. 6 - 8, сделайте выводы о необходимости применения рассмотренных кодов, исправляющих ошибки (см. табл. 14).

Сделайте выводы о разработанной оптической системе передачи информации.

### Контрольные вопросы

1. Дисперсия в многомодовом градиентном оптическом волокне.
2. Дисперсия в ступенчатом оптическом волокне.
3. Какой вид дисперсии не учитывался в курсовом проектировании?
4. Для чего применяются волокна со смещенной дисперсией?
5. Хроматическая дисперсия. Материальная дисперсия. Волноводная дисперсия.
6. Как увеличить расстояние передачи в ВОЛС?
7. Как размещается модуль компенсации дисперсии?
8. Какой вид дисперсии можно компенсировать и почему?
9. Виды оптических усилителей.
10. Предложите 3 способа преодоления негативных факторов дисперсии в ВОСП.
11. Преимущества цифровых ВОСП.
12. Методы многоканальной передачи в ВОЛС.
13. Из чего складываются потери в ВОСП?
14. Окна прозрачности.

## Библиографический список

1. Ramaswami R., Sivarajan K., Sasaki G. Optical networks: a practical perspective. – Morgan Kaufmann, 2009. – 893 p.
2. Рекомендация МСЭ-Т G.652. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля. – Женева: Международный союз электросвязи, 2017. – 28 с.
3. Рекомендация МСЭ-Т G.655. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с ненулевой смещенной дисперсией. – Женева: Международный союз электросвязи, 2017. – 26 с.
4. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы: сб. статей / под ред. С.А. Дмитриева, Н.Н.Слепова. – М.: Connect, 2005. – 576 с.
5. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи. – М.: Р и С, 2002. – 312 с.
6. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 272 с.
7. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave Russian Edition. 2003. № 1. С. 14-19.
8. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave Russian Edition. 2003. № 1. С. 22-29.
9. Скляр О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 240 с.
10. ГОСТ 26599-85. Системы передачи волоконно-оптические. Термины и определения.
11. Андреев В.А., Бурдин А.В., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи. Проектирование, строительство и техническая эксплуатация. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 424 с.