

Московский Технический Университет Связи и Информатики

на правах рукописи

ГРИГОРЬЯН АРТЕМ КАРЕНОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОЙ  
МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ И  
ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИЙ НА  
ПЕРЕДАЧУ СИГНАЛОВ И МЕТОДОВ ИХ КОМПЕНСАЦИИ  
ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПЕРЕДАЧИ**

Специальность: 05.12.13. - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Портников Э.Л.

Москва 2014

## Содержание:

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. Основные положения для разработки методики определения хроматической дисперсии при передаче сигналов по оптическим волокнам G-652 и G-655 МСЭ-Т</b> .....	18
1.1 Постановка задачи.....	18
1.2 Уточнение исходных данных, связанных с определением хроматической дисперсии в одномодовом оптическом волокне с учетом современных форматов модуляции.....	26
1.3 Двулучепреломление и поляризационная модовая дисперсия. Влияние поляризационной модовой дисперсии на передачу сигнала. ....	40
1.4 Решения, полученные ранее и нормы на поляризационную модовую дисперсию.....	52
1.4а Решения, рекомендованные Фриманом.....	52
1.4б Решения по Убайдуллаеву.....	53
1.4в Решения по Каминову.....	54
1.4г Решения, полученные Агравалом.....	55
1.4д Действующие стандарты по поляризационной модовой дисперсии.....	55
Выводы по первой главе:.....	61
<b>Глава 2. Основы распространения сигналов в форме гауссовского импульса по оптическому волокну с учетом ПМД и современных форматов модуляции</b> .....	63
2.1 Основы распространения сигналов в форме гауссовского импульса по ОВ с учетом формата модуляции.....	63
2.2 Связь между хроматической дисперсией и поляризационной модовой дисперсией (новый подход) и подтверждение полученных решений.....	66
2.3 Ускоренное решение по определению вероятности ошибки в волоконно-оптической линии передачи.....	78
Выводы по второй главе:.....	88
<b>Глава 3. Методика расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии</b> .....	90
3.1. Упреждающая коррекция ошибки при скоростях передачи 10-100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ и CRZ.....	90
3.2 Выбор оптимальной длины усилительного участка по затуханию в ОВ с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсии.....	98
3.3 Методика расчета компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий	114
3.3.1 Методика расчета компенсации ХД с помощью компенсирующих ОВ.....	114
3.3.2 Другие методы компенсации ХД.....	135
Выводы по третьей главе:.....	145
<b>Глава 4. Алгоритмическая методика определения хроматической и поляризационной модовой дисперсии и методика экспериментального подтверждения</b> .....	146
4.1. Алгоритм решения по выбору длины усилительного участка с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсий, методов модуляции, предварительной коррекции ошибок и методов кодирования.....	146

4.2 Расчетные и измерительные методы сравнения полученных результатов .....	164
Выводы по четвертой главе: .....	178
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	184
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	192

### **Приложения:**

- 1) акты внедрения;
- 2) 3 патента на изобретения конструкций волоконно-оптических кабелей;

## ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке современной методики определения влияния хроматической и поляризационной дисперсий на передачу сигналов и методов их компенсации при высоких скоростях передачи (40-100 Гбит/с), при спектральном уплотнении ВОСП-СР на одномодовых оптических кварцевых волокнах, корректировке допустимых длин регенерационных и усилительных участков, в зависимости от типа оптических волокон (ОВ), числа оптических усилителей и видов модуляции.

Широкое внедрение на транспортной (магистральной и внутризонавой) сети Российской Федерации (РФ) волоконно-оптических линий связи требует оптимальных решений по выбору ОВ, например G-655 (A,B,C) МСЭ-Т и новых современных конструкций волоконно-оптических кабелей (ВОК). Однако, уже созданная транспортная сеть была ориентирована на дешевые ОВ по рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) G-652 (A,B,C,D). Этот тип ОВ в самом широко используемом окне прозрачности имеет достаточно большое значение хроматической (16-18 пс/нм·км) и поляризационной дисперсий ( $0,2-0,5\text{пс}/\sqrt{\text{км}}$ ) при высоких скоростях передачи (выше 10 Гбит/с).

В известных работах Дж. Гауэра [6], Г. Агравала [5,11], И. Каминова [98], А. Жирара [61], А.Б. Иванова [22], Р.Р. Убайдуллаева [24, 29, 61], В.Н. Листвина и др.[1-30] рассматриваются физические процессы, протекающие при распространении сигналов по оптическому волокну (ОВ). Фундаментальные основы оптических волноводов исследованы в монографиях Д. Маркузе [75], Х.Г. Унгера, Г. Агравала, А. Снайдера и Дж. Лав, Дж. Гауэра и др. [1-30]. В приложении к технике оптической связи теория получила развитие в работах Е.М. Дианова, Н.А., И.И. Гроднева [1], А.С. Беланова, Т.А. Черенкова и др. [1-100].

За последние 15 лет исследований было написано более 400 работ по поляризационной модовой дисперсии. Наиболее известные авторы по этому направлению: И.Р. Каминов [98], М. Карлссон [96], К. Миньяк [97], А. Гальтаросса [97], А. Бьярклев, М. Накасава, Х. Вебер, С. Сомеда и другие.

Известно [13,16], что важными факторами, влияющими на широкое внедрение на оптическом волокне спектрального уплотнения по длине волны при высоких скоростях передачи 40-100 Гбит/с, являются:

1. Затухание
2. Хроматическая дисперсия
3. Поляризационная модовая дисперсия
4. Нелинейные эффекты.

При выборе длины усилительного или регенерационного участков определяющим фактором является при скорости передачи выше 10 Гбит/с хроматическая и поляризационная дисперсии, несмотря на то, что выбор длины участка осуществляется по затуханию. Поэтому, стараются уменьшить коэффициент затухания оптического волокна и значение хроматической и поляризационной модовой дисперсий в рассматриваемых спектрах передаваемых сигналов в современных оптических волокнах.

Поляризационная дисперсия начинает оказывать неприятные воздействия на характеристики передачи и выбор длины усилительного и регенерационного участка при скоростях 10 и 40 Гбит/с и выше [91]. ПМД является средней величиной дифференциальной групповой задержки, а дифференциальная групповая задержка – это разница во времени распространения, возникающая между двумя состояниями (быстрой и медленной составляющими моды распространения). Эти состояния характеризуются максимальным и минимальным временем распространения по ОВ при любом исходном состоянии поляризации. ДГЗ зависит от длины волны.

Нелинейные эффекты могут вмешаться в этот процесс, в случае превышения пороговой мощности, при которой они воздействуют на передачу при спектральном уплотнении и большой суммарной мощности, вводимой в ОВ [91].

Емкость оптической инфраструктуры телекоммуникации на магистральных сетях увеличилась с 1987 года в 1000 раз за 20 лет (1,6 Тбит/с в 1987 году до 1,6 Пбит/с в 2007 году). Информационная скорость сейчас составляет 1 Тбит/с и ежегодно увеличивается на 40% несмотря на экономический спад. Считается, что в следующие 20 лет скорость увеличится до 1 Пбит/с, т.е. в 1000 раз. Наступит эра скоростей Петабит/с что приведет к внедрению ультра качественного телевидения в формате 3D и ультра реалистической связи. Это требует создания нового поколения сетей на основе новой оптической инфраструктуры на основе скорости, равной Пбит/с.

Оптические усилители и их полоса усиления определяют скорость передачи по ОВ. В окне S-Диапазона 1460-1530нм (70нм-9,4 ТГц) вместе с C-Диапазоном 1530-1565 нм (35нм-4,4 ТГц) и L- диапазоном 1565-1625нм (60нм-7,1 ТГц). В сумме получим 1460-1625 нм (165нм – 20,9ТГц). На практике общая скорость будет ограничена 150 Тбит/с. В настоящее время максимальная суммарная емкость составляет 10 Тбит/с ( 8 пар ОВ с 1,28 Тбит/с на одно ОВ) с питанием подводной системы от материка по оптическим усилителям .

Поэтому в настоящее время на транспортной сети необходимо решать задачи, возникающие при высоких скоростях передачи: либо канал на скорости передачи более 1000 Тбит/с, либо много каналов (более 1000) при скоростях передачи 100 Гбит/с для того, чтобы обеспечить высокоскоростной доступ к абоненту.

### **Постановка задачи**

Согласно Фриману [45] поляризационная модовая дисперсия (ПМД) вызывает межсимвольные искажения. Оценка этого явления - ухудшения показателей системы передачи примерно на 1 дБ происходит при полной дисперсии (хроматической и поляризационной)  $-0,4 T_b$ . Доля ПМД –  $0,1T_b$ , где  $T_b$  битовый интервал, пс;  $V=1/T_b$  скорость передачи Гбит/с.

Влияние ПМД на ВОСП-СП возрастает:

- с увеличением скорости передачи в канале,
- с увеличением длины линии,
- с увеличением числа каналов.

Поэтому в настоящее время необходимо определить влияние ПМД на передачу сигналов с учетом хроматической дисперсии.

За последние 15 лет по теме поляризационной модовой дисперсии в оптических волокнах были даны определения, методы измерений и методы симуляции, разработаны теоретические положения по принципиальному положению поляризации (PSP) на основании решений на сфере Пуанкаре. Были рассмотрены изотропные и анизотропные составляющие ПМД, причем анизотропные составляющие не решаются на сфере Пуанкаре, а решаются с пространством Стокса, Джонса и Пойтинга.

В задачу настоящей работы входит рассмотрение изотропной составляющей ПМД первого порядка и её влияние на передачу сигналов по линии с оптическими кварцевыми волокнами.

Согласно документу МСЭ G-691 было определено влияние ПМД на ухудшение передачи сигналов и ограничение на максимальную задержку. Однако, допустимое значение ПМД по задержке не должно превышать 0,1 Тб. Введенное понятие ПМД<sub>q</sub> дает возможность оценить решения на линии и позволяет избежать завышенных значений ПМД, но не позволяет оценить совместные действия ПМД и хроматической дисперсии.

Одной из наиболее динамично развивающихся оптических технологий, позволяющих увеличить пропускную способность ВОЛС, является спектральное, или волновое, мультиплексирование (Wavelength Division Multiplexing – WDM), которое называют также спектральным уплотнением (ВОСП-СП). Структура системы передачи со спектральным уплотнением показана на рис. 1.[91]

Практический успех технологии спектрального уплотнения во многом обеспечили оптические усилители, поскольку они являются широкополосными устройствами и способны усиливать групповой оптический сигнал. Именно по этой причине в линейных трактах систем со спектральным уплотнением в качестве промежуточных устройств экономически эффективно применять оптические усилители. Однако совсем без промежуточных усилителей построить линейные тракты большой протяженности невозможно. Дело в том, что оптические усилители способны компенсировать только энергетические потери в ОВ и не позволяют избежать накопления шумов и искажений от участка к участку. Поэтому после нескольких усилительных участков (обычно после 6-8) приходится ставить регенератор, причем свой на каждую длину волны [91].

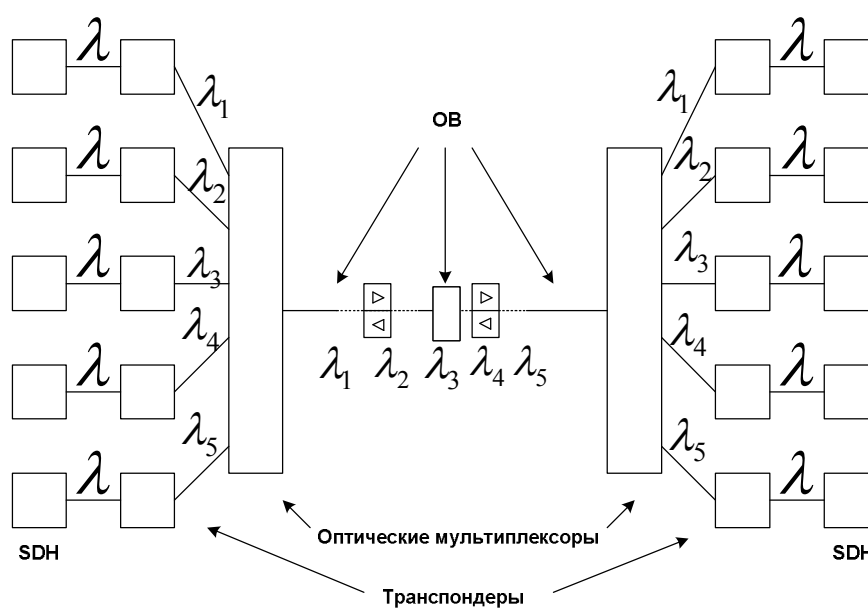


Рис.1. Структура СП со спектральным уплотнением

Другими компонентами, которые необходимы для реализации технологии спектрального уплотнения, являются источники оптического излучения с высокой степенью когерентности и точным значением частоты излучения, преобразователи длин волн (транспондеры), оптические приемные фильтры, оптические мультиплексоры и демультиплексоры, компенсаторы дисперсии и



т.д., которые вносят свой вклад в увеличение значения ПМД на действующей линии[91].

Системы передачи со спектральным уплотнением являются основным средством создания полностью оптических транспортных сетей.

Следует отметить, что практические достижения в области применения технологии спектрального уплотнения очень высоки. Уже достигнут «терабитный» уровень пропускной способности таких систем.

Шаг оптических несущих частот регламентирован в рекомендации МСЭ-T G.692

Следует отметить, что большинство параметров ВОЛС со спектральным уплотнением являются взаимозависимыми. В частности, увеличение количества оптических каналов (максимальная ширина диапазона при минимальном шаге) приводит к уменьшению перекрываемого затухания и ограничивает скорость передачи по одному оптическому каналу. Увеличение скорости передачи также приводит к уменьшению перекрываемого затухания.

Спектральное уплотнение с шагом несущих частот, равным или меньшим 100 ГГц относят к категории DWDM (Dense DWDM), или плотного спектрального уплотнения. ВОЛС с DWDM используются главным образом на супермагистральных. Особенностью этих ВОЛС, рассчитанных на большие расстояния и на образование большого количества оптических каналов, является линейная конфигурация.

В отечественной практике разработано ряд методик [31, 70, 127, 128, 91] для определения длин регенерационных участков, которые не полностью соответствуют предъявляемым требованиям:

- не учтены решения по современным форматам модуляции при расчете дисперсионных параметров (ХД и ПМД);

- не учтены современные решения по современным форматам модуляции с учетом предварительной коррекции ошибки, ХД и ПМД
- не учтены современные методы кодирования, улучшающие возможности передачи при наличии ХД и ПМД,
- не проверены полученные решения на экспериментальных результатах;
- не учтены ПМД при выборе метода компенсации ХД.

Основной целью данной диссертационной работы является разработка современной методики расчета параметров ВОЛС с учетом хроматической дисперсии, ПМД первого и второго порядков, с учетом формата модуляции, предварительной коррекции ошибки и вероятности ошибки для систем передачи при скоростях передачи 40-100 Гбит/с с учетом ВОСП-СР.

#### **Актуальность темы и состояние вопроса**

Возрастание требований к широкополосности пропускной способности сети связи на всех участках транспортной сети и сети доступа приводит к необходимости увеличения скорости передачи с 10 Гбит/с до 100 Гбит/с и выше, и внедрения спектрального уплотнения ВОСП-СР. Если при малых скоростях передачи на длину участка регенерации определяющим фактором был параметр затухания (до 6 Гбит/с), то с 10 Гбит/с и выше длину участка регенерации определяет хроматическая дисперсия, а с 40 Гбит/с ХД и ПМД. При внедрении спектрального уплотнения требуется увеличить суммарную мощность, что приводит к нелинейным эффектам.

Вместе с тем, сочетание методов модуляции, нелинейных эффектов за счет усиления сигналов и дисперсионных параметров оптических волокон (ОВ) позволяет управлять режимом компенсации хроматической дисперсии и учитывать ПМД.

Фундаментальные основы физических процессов в двухслойных диэлектрических волноводах, результаты экспериментальных исследований изложены в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых. Из них можно выделить работы А.М.Прохорова, Е.М. Дианова, Д. Маркузе, Д.

Гауэра, И. Каминова, А. Хасегавы, Ф. Тапперта, Г.А. Хауса, Г.Агравала и очень многих отечественных ученых [1-34, 91, 93].

Для современных наземных волоконно-оптических линий связи типичная длина участка регенерации в зависимости от скорости передачи и типа ОВ лежит в пределах 80-300км, а длина усилительного участка 40-100 км. Уточнение характеристик передачи стандартного ОВ типа G-652 по рекомендации МСЭ-Т и ОВ типа G-655 по тем же рекомендациям позволит оптимально решить задачу по компенсации хроматической дисперсии и ПМД для современных форматов модуляции, предварительной коррекции ошибок и современных методов кодирования [35-111].

### **Цель работы и задачи исследований**

Диссертационная работа посвящена разработке современной методики определения влияния дисперсионных характеристик ХД и ПМД при современных форматах модуляции и предварительной коррекции ошибки с учетом избыточности мощности сигнала с применением различных кодов при скоростях передачи 40 Гбит/с и выше с использованием ВОСП-СР.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- Разработка метода расчета длины усилительного и регенерационного участка с учетом параметров хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии и современных форматов модуляции при скоростях передачи 40 и 100 Гбит/с для ОВ G-652 и G-655 по рекомендации МСЭ-Т;
- Определение длины РГУ с учетом ХД и ПМД для скоростей передачи 40 – 100 Гбит/с;
- Уточнение решений по определению отношения сигнал/шум для одноволновой передачи для рассматриваемых типов ОВ ХД и ПМД;
- Уточнение решений по определению отношения сигнал/шум и коэффициента битовых ошибок для ОВ при ВОСП-СР с учетом ПМД;

- Решения по предварительной коррекции ошибок с применением современных кодов с учетом ХД и ПМД.

### **Методы исследований**

При решении поставленных задач использовались методы теории оптических волноводов, нелинейной оптики, теории линий передачи, теории дифференциального и интегрального исчисления и численного моделирования.

### **Личный вклад**

Все основные научные положения, выводы и рекомендации, составляющие содержание диссертационной работы, получены автором лично.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Получена современная методика для определения длины усилительного и регенерационного участка при влиянии хроматической дисперсии и ПМД для ОВ по рекомендации G-652 и G-655 МСЭ-Т для скоростей передачи 40 Гбит/с и выше с учетом форматов модуляции, предварительной коррекции ошибки и отношения сигнал\шум в оптическом канале;
- Получены оригинальные решения для определения отношения сигнал/шум и коэффициента битовых ошибок для указанных выше задач;
- Доказана необходимость учета выше названных характеристик при определении длины регенерационного и усилительного участков;
- Разработана уточненная методика расчета длины регенерационного участка с учетом избыточности усиления с применением современных кодов для управления дисперсией на ВОСП-СП;
- Получены 3 патента на конструкцию ВОК, позволяющие оптимально и в короткий срок устранить повреждения на волоконно-оптической линии связи.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Современная алгоритмическая методика расчета длины усилительного и регенерационного участка при влиянии хроматической дисперсии и ПМД с учетом современных форматов модуляции, предварительной коррекции ошибок и

отношения сигнал/шум в оптическом канале при скоростях передачи 40 Гбит/с – 100 Гбит/с для ОВ G-652 и G-655 по рекомендации МСЭ-Т;

- Решения, связанные с определением отношения сигнал/шум для одноволновой передачи для рассматриваемых типов ОВ, ХД и ПМД;
- Решения, связанные с определением отношения сигнал/шум и коэффициента битовой ошибки для рассматриваемых ОВ и современных форматов модуляции при ВОСП-СР с учетом и без учета избыточности сигнала при применении современных кодов.

### **Реализация результатов работы**

Основные результаты исследований, рекомендации по методикам расчета хроматической и поляризационной дисперсий и длины РГУ и методики определения отношения сигнал/шум и вероятности ошибки внедрены на предприятиях «Ростелеком», Гипросвязь, в учебный процесс МТУСИ.

Полученные патенты на конструкции ОК могут быть использованы заводами, производящими ОК.

Методики расчета хроматической дисперсии и ПМД, отношения сигнал/шум и коэффициента битовой ошибки для ВОСП-СР внедрены в учебный процесс МТУСИ в курсы «Волоконно-оптические линии связи», «Оптические направляющие системы и пассивные компоненты», а также в курсы повышения квалификации «Оптические кабели и пассивные компоненты», «Волоконно-оптические линии связи, строительство и эксплуатация», «Волоконная оптика в телекоммуникациях».

Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на конференциях:

- международная отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества» (Россия, Москва, 2010г., 2011г., 2012г., 2013.г.);
- международный форум информатизации Международной Академии информатизации (Россия, Москва, 2010 г., 2011г., 2012 г., 2013 г., 2014 г.);
- научная сессия посвященная дню радио РНТОРЭС им. А.С. Попова (Россия, Москва 2011 г.);
- международная научно-техническая конференция «ИНТЕРМАТИК», 2012, 2013г.г.

## Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 19 печатных трудах, трех патентах на изобретение. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, и двух приложений.

В первой главе разработаны основные положения для создания методики определения хроматической и поляризационной модовой дисперсий при передаче сигналов по оптическим волокнам G-652 и G-655.

Показано, что на основании решения Гауэра и Агравала определение начальных исходных данных сигнала на основе гауссовского импульса получены точные решения по определению дисперсионной длины ХД, ПМД, ХД+ПМД, которые устанавливают четкую связь между сигналом передачи (система передачи) и дисперсией (характеристика оптического волокна, по которому передается сигнал). На основании этой связи определяется зависимость характеристик передачи от формата модуляции для различных скоростей передачи (например, 40Гбит/с и 100 Гбит/с) при работе по оптическим волокнам G-652 и G-655 по рекомендации МСЭ-Т.

Показано, что независимо от выбранного параметра ( $T_0$  - полуширина импульса по уровню интенсивности от максимального значения,  $\frac{T_1}{2}$  - полная длительность по уровню половины максимальной интенсивности,  $T_6$  - битовый период, равный  $\frac{1}{B}$ , где  $B$  - скорость передачи), дисперсионная длина по ХД не изменяется, а с учетом ПМД уменьшается.

Доказано, что простые решения по уширению импульса, связанные с дисперсионной длиной однозначно согласуются с результатами, полученными Агравалом [11].

Кроме того, эти решения связаны с Q-фактором, который определяет отношение сигнал/шум в оптическом канале.

Уточнены выражения по распространению сигналов на основе гауссовского импульса с учетом формата модуляции. Показано, что допустимая длина по хроматической дисперсии с учетом поляризационной модовой дисперсии и с учетом допустимого Q-фактора изменяется и зависит не только от хроматической дисперсии, но и упреждающей коррекции ошибки.

Во второй главе исследовано влияние ПМД на уменьшение длины участка регенерации с учетом формата модуляции. Доказано, что при допустимых потерях на дисперсию в 2 дБ можно увеличить длину участка регенерации до  $1,25L_d$ . Это можно рассматривать как один из пассивных методов компенсации хроматической дисперсии в одномодовых оптических волокнах при формате модуляции NRZ (невозврата к нулю). При спектральном уплотнении и формате модуляции RZ этот метод также применяется для увеличения длины участка регенерации. Показано воздействие ПМД на допустимую длину при расстоянии между каналами  $\Delta\lambda^1$ .

В третьей главе рассмотрены методика расчета компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий, упреждающей коррекции ошибок при форматах модуляции NRZ, RZ, CRZ. Показано воздействие упреждающей коррекции ошибок (УКО) на выбор длины усилительного или регенерационного участков с учетом хроматической (ХД) и поляризационной модовой (ПМД) дисперсий и на отношение сигнал/ шум. Рассмотрена известная методика компенсации ХД и её воздействие на ПМД при различных схемах компенсации ХД. Предложена схема компенсации ХД и ПМД с помощью модового трансформатора за счет преобразования LP01 в LP02 и обратно.

В четвертой главе представлена методика расчета длины регенерационного участка для одноволновой передачи и ВОСП-СР с учетом ограничений по дисперсии, при ограничении расстояний между каналами ВОСП-СР для скоростей передачи 10 и 40 Гбит/с для ОВ типа G-652 и G-655 по рекомендации МСЭ-Т. При этом полученная связь между 7-ю параметрами (ОСШ в оптическом канале, ОСШ в электрическом канале, хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия, дисперсионная длина по хроматической дисперсии, дисперсионная длина по хроматической и поляризационной модовой дисперсиям и суммарная дисперсионная длина в зависимости от скорости передачи и типа ОВ), позволяет, в зависимости от характеристик передатчиков и приемников системы передачи и системы ВОСП-СР, оптимально выбрать допустимую длину участка регенерации и усиления.

В заключении изложены основные результаты работы, полученные в диссертационной работе, а именно:

- Разработана современная алгоритмическая методика расчета определения длины усилительного и регенерационного участка за счет хроматической дисперсии и межсимвольной интерференции ПМД с учетом отношения сигнал/помеха в оптическом канале и современных форматов модуляции и предварительной коррекции ошибки для скоростей передачи 40 - 100 Гбит/с для оптических волокон G-652, G-655 по рекомендации МСЭ-Т;
- Получены решения, связанные с дисперсионной длиной и параметром Q-фактором, определяющим значение коэффициента битовой ошибки и длину регенерационного участка;
- Разработана методика определения Q-фактора при условии типовой передачи с учетом ПМД и различных форматов модуляции;
- Разработана уточненная методика расчета ОСШ в оптическом канале для системы передачи ВОСП-СР с учетом форматов модуляции и применением современных кодов;



- Разработана современная оригинальная алгоритмическая методика расчета компенсации ХД с учетом ПМД.

# **Глава 1. Основные положения для разработки методики определения хроматической дисперсии при передаче сигналов по оптическим волокнам G-652 и G-655 МСЭ-Т**

## **1.1 Постановка задачи**

Задачей данной главы является – представить уточненные исходные данные, основанные на характеристиках Гауссовского импульса с учетом основных форматов модуляции и решить задачу по хроматической дисперсии для систем передачи на скоростях 40 и 100 Гбит/с при работе по оптическому волокну G-652 и G-655 рекомендации МСЭ-Т. ф

Согласно международному стандарту (МСЭ) – Международного союза электросвязи существует большое количество видов одномодовых оптических волокон по рекомендации G.65х.

Так, например:

G-652 – стандартное одномодовое оптическое волокно,

G-653 – одномодовое оптическое волокно со смещенной дисперсией,

G-654 – одномодовое оптическое волокно со смещенной длиной волны отсечки,

G-655 – волокно с ненулевой смещенной дисперсией (1530 – 1565 нм),

G-656 – широкополосное оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (диапазон 1460 нм – 1625 нм).

G-657 - оптическое волокно с малыми изгибными потерями.

С течением времени изменился общий формат этих стандартов. Так, для ОВ G-652 появились четыре типа ОВ – А, В, С, D (таблица 1.2). Для рекомендации G-655 появились три типа ОВ – А, В, С .

Во-первых, улучшены характеристики затухания, рассматриваемые в более широкой полосе частот. Во-вторых, изменяются характеристики хроматической

дисперсии. В-третьих, улучшены характеристики поляризационной модовой дисперсии. В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики некоторых типов ОВ по рекомендации G-655 на длине волны  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$  (типы А, В, С) в сравнении с ОВ по рекомендации G-652. G.652 (SMF) - стандарты привели к улучшению ПМД и затухания на длине волны 1383 нм. Оба изменения улучшают работу 40 Гбит/с систем[91].

Таблица 1.1 Параметры ОВ SMF-28ULL.

Параметр волокна	Единицы	Типичное	Спецификация
Длина волны отсечки в кабеле	нм		<1260
Затухание 1310 нм	дБ/км	0,28	0,31
Затухание 1550 нм	дБ/км	0,17	0,18
Затухание 1625 нм	дБ/км	0,20	0,21
MFD 1310 нм	мкм	9,2	$\geq 8,70$ $\leq 9,70$
MFD 1550 нм	мкм	10,7	$\geq 10,20$ $\leq 11,20$
PMD <sub>Q</sub>	пс/км <sup>1/2</sup>		<0,04
PMD <sub>MAX</sub>	пс/км <sup>1/2</sup>		<0,10
$\lambda_0$	мкм	1314	$\geq 1304$ $\leq 1324$
Наклон дисперсии (1310 нм)	пс/(нм <sup>2</sup> ·км)	0,08	<0,092
Дисперсия (1550 нм)	пс/(нм <sup>2</sup> ·км)	16	<18,0

Волокно SMF-28 ULL имеет самые низкие затухание и PMD среди всех волокон ITU-T G.652, доступных на сегодняшний день(таблица 1.2).

Таблица 1.2. Волокно SMF-28e+ LL имеет самые низкие затухания и PMD среди всех волокон ITU-T G.652.D, доступных на сегодняшний день. Волокно SMF-28e+ LL полностью совместимо со стандартными одномодовыми волокнами G.652.D.

	Corning Волокно SMF-28e+ LL	Конкурент А	Конкурент В	Конкурент С
1310 нм (дБ/км)	$\leq 0,32$	$\leq 0,34$	$\leq 0,33$	$\leq 0,35$
1550 нм (дБ/км)	$\leq 0,18$	$\leq 0,21$	$\leq 0,19$	$\leq 0,21$
1625 нм (дБ/км)	$\leq 0,20$	$\leq 0,24$	$\leq 0,22$	$\leq 0,23$
PMD <sub>q</sub> (пс/ $\sqrt{\text{км}}$ )	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,08$	$\leq 0,06$

Появление систем с расстоянием между каналами в 100 и 50 ГГц привело к увеличению допустимого диапазона дисперсии.

Таблица 1.3. Оптическое волокно Corning LEAF (самое низкое затухание в категории G.655).

	Corning LEAF LL	Конкурент А	Конкурент В	Конкурент С
1550 нм (дБ/км)	$\leq 0,19$	$\leq 0,22$	$\leq 0,22$	$\leq 0,23$
1625 нм (дБ/км)	$\leq 0,21$	$\leq 0,24$	$\leq 0,24$	$\leq 0,25$
1383 нм (дБ/км)	$\leq 0,4$	$\leq 0,7$	$\leq 0,4$	$\leq 1,0$
$A_{\text{eff}}$ (мкм <sup>2</sup> )	72	63	55	72

Таблица 1.4. Сравнение ОВ (G-655 А, В, С) с ОВ G-652 по  $D$  и  $A_{\text{эфф}}$ .

	Дисперсия	Наклон дисперсии	$A_{\text{эфф}}$
Волокно	(пс/нм·км)	(пс/ нм <sup>2</sup> /км)	μм <sup>2</sup>

NZ-DSF-A	2 - 6	0.09	72
NZ-DSF-B	4 - 8	0.05	55
NZ-DSF-C	4 - 8	0.06	60
ULS- NZDSF	4 - 6	0.02	47
SMF	16 - 18	0.07	80-90

Таблица 1.4А Характеристики одномодовых волокон SMF-28.

Fiber attribute	Units	Corning		
		SMF-28 ULL	SMF-28e+LL	SMF-28e+
Cable cutoff	nm	< 1260	< 1260	< 1260
Attenuation @ 1625 nm	dB/km	0,21 (0,20)	0,20	0,24
Attenuation @1550nm	dB/km	0,18(0,17)	0,18	0,20
Attenuation @1310nm	dB/km	0,31(0,28)	0,32	0,35
PMD <sub>Q</sub>	ps/ $\sqrt{\text{км}}$	< 0,04	< 0,04	< 0,06
PMD <sub>max</sub>	ps/ $\sqrt{\text{км}}$	< 0,1	< 0,1	< 0,2
$\lambda_0$	$\mu\text{m}$	$\geq 1304$ $\leq 1324$	$\geq 1310$ $\leq 1324$	$\geq 1310$ $\leq 1324$
Dispersion Slope (1310 nm)	ps/(nm <sup>2</sup> ·km)	< 0,092	< 0,091	< 0,091
Dispersion Slope (1550 nm)	ps/(nm·km)	< 18,0	< 18,0	< 18,0

При создании ВОЛС применяются различные виды передатчиков. Для улучшения характеристик хроматической дисперсии наиболее совершенным является применение DFB-лазеров с внешней модуляцией [91].

Согласно рекомендациям МСЭ-Т проведено уточнение или расширение числа окон прозрачности по применяемым диапазонам для одномодовых оптических волокон.

Таблица 1.5. Диапазоны использования одномодовых ОВ.

Обозначение диапазонов	Название диапазонов	Диапазон (нм)	Ширина полосы (ТГц)
О – диапазон	Основной	1260 – 1360	17,5
Е – диапазон	Расширенный	1360 – 1460	15,1
S – диапазон	Коротковолновый	1460 – 1530	9,4
<b>С – диапазон</b>	<b>Стандартный</b>	<b>1530 – 1565</b>	<b>4,4</b>
<b>L – диапазон</b>	<b>Длинноволновый</b>	<b>1565 – 1625</b>	<b>7,1</b>
U – диапазон	Сверхдлинноволновый	1625 - 1675	5,5
Итого			59,0

Спектральное уплотнение, увеличение числа каналов в оптическом волокне, появление систем с расстоянием между каналами 100 и 50 ГГц привело к необходимости увеличения допустимого диапазона DWDM. Поэтому, в стандарте G-655 появились 3 типа ОВ: А, В, С[91].

Развитие технологий передачи: рамановское усиление, плотное спектральное уплотнение DWDM (расстояние между каналами 25 ГГц), передача большего числа каналов по одному волокну при высоких скоростях передачи (40 Гбит/с) потребовало создания волокна с более высокой величиной хроматической дисперсии и большей площадью  $A_{эфф}$ . Это позволяет уменьшить нелинейные эффекты, и в частности, четырех волновое смешивание. Новое волокно выходит

за рамки стандарта G-655, при максимальном значении хроматической дисперсии 12 пс/нм·км в диапазоне 1525 – 1575 нм[91].

Согласно существующим рекомендациям требования к хроматической дисперсии исходят из двух положений:

1. Уширение импульса при ХД должно быть не больше  $\Delta\tau \leq \frac{0,25}{B}, \text{нс}$ ,

Где  $B$  – скорость передачи бит/с, а  $\Delta\tau$  - пс

С учетом ПМД уширение импульса может быть принято  $0,3/B$  пс.

2. При этом необходимо, чтобы ухудшение передачи для модуляционного формата NRZ было не больше 1 дБ по мощности. Это положение оставляет запас по поляризационной дисперсии первого порядка

$$\Delta\tau \leq \frac{0,1}{B} - \frac{0,15}{B}, \text{нс}.$$

Суммарная дифференциальная групповая задержка за счет хроматической и поляризационной дисперсии для оптического волокна должна быть меньше 30 пс для скорости передачи 10 Гбит/с, при этом необходимо учитывать поляризационную дисперсию пассивных и активных элементов ВОЛС.

Учитывая, что ПМД первого порядка каждой строительной длины имеет свое значение, было предложено в стандартах МСЭ-Т G-691 при 20 строительных одинаковых длинах, чтобы полученное значение не превышало значение  $\text{PMD}_Q$ , где  $q$  - вероятность, равная  $10^{-4} = 0,01\%$

Таким образом, необходимо на приеме, чтобы  $\text{ДГЗ}_{\text{макс}} = \frac{30\%}{B}$ , при  $\text{ДГЗ}_{\text{макс}} \text{ОВ} = 25 \text{нс}$ .  $\text{PMD}_Q = 0,5 \text{нс} / \sqrt{\text{км}}$  при  $M=20$   $q=0,01\%$  при скорости передачи 10 Гбит/с. В настоящее время требования ужесточились и  $\text{PMD}_Q < 0,2 \text{нс} / \sqrt{\text{км}}$  при  $M=20$  и  $Q = 10^{-4}$ .  $\text{ДГЗ ПМД}_{\text{ов}} + \text{линия} = 0,15 \text{Тб}$ .

Уменьшение затухания ОКЛ добились за счет более точной геометрии ОВ при изготовлении, соединении по всем стандартам G-652 – G-655, уменьшение водяного пика ОН в рекомендации G.652C и D позволяет использовать широкополосные волокна со спектральным уплотнением CWDM.

На рис. 2 представлена характеристика хроматической дисперсии стандартного волокна по рекомендации G-652 и значения дифференциальной групповой задержки на рис. 3.

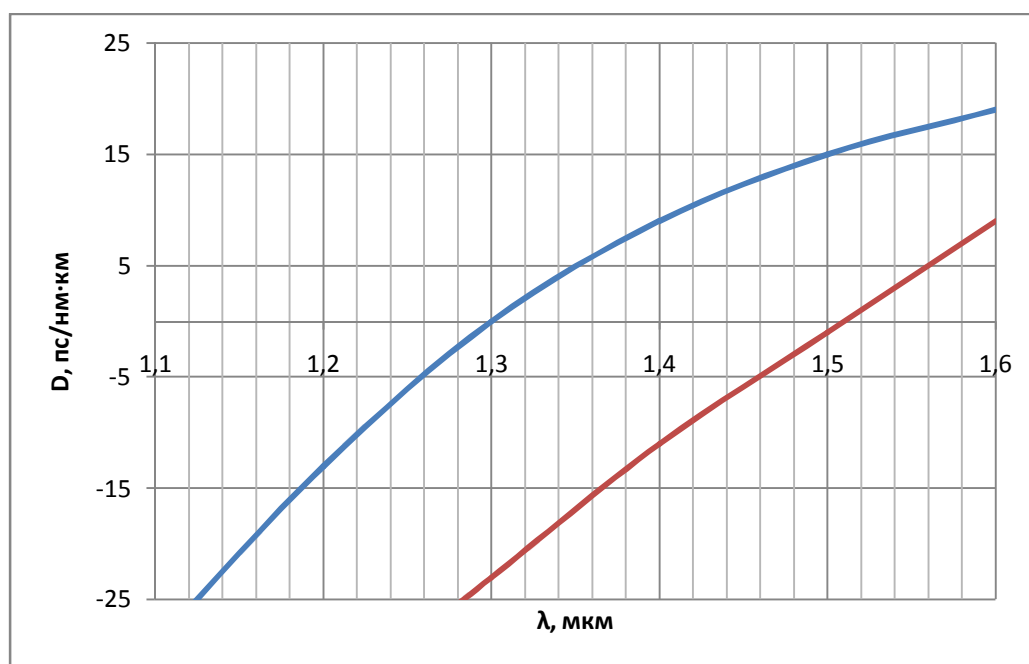
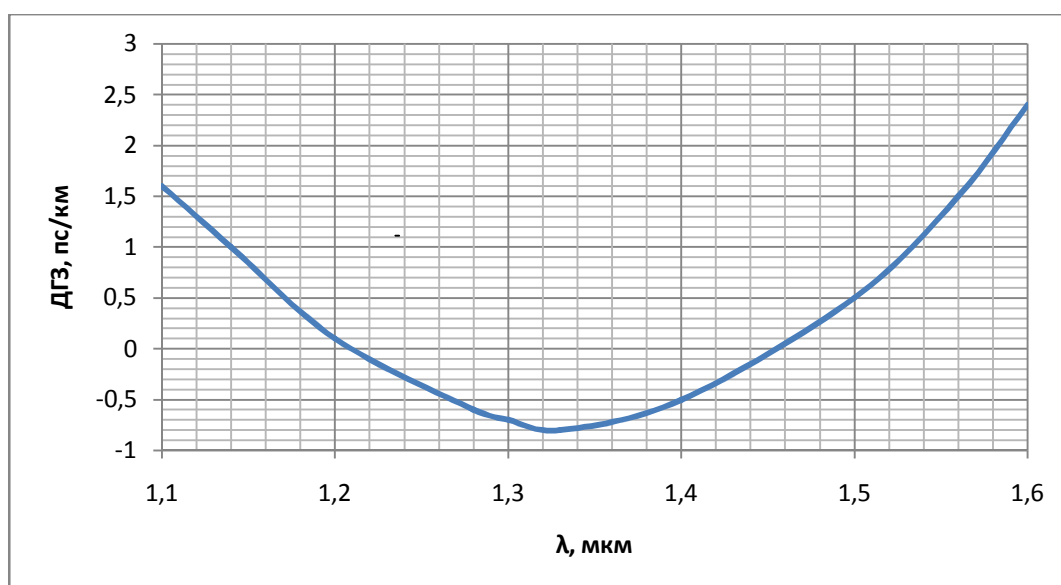


Рис. 2 Хроматическая дисперсия ОВ (G-652, G-655)





### Рис.3 Изменения ДГЗ для ОВ (G-652, G-655)

Как можно видеть, для стандартного ОВ на длине волны 1,55 мкм при 17 пс/нм·км дифференциальная групповая задержка может составлять 1,7 пс/км. Поэтому, для протяженных линий и современных высокоскоростных систем передачи требуются более современные ОВ по рекомендации G-655 МСЭ-Т.

Следует отметить, что:

- совершенствуются не только волокна по рекомендации G-655, но и по рекомендации G-652 и другим приложениям;
- с увеличением скоростей передачи по ОВ совершенствуются нормы и требования к характеристикам затухания, хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии;
- при скоростях передачи 40-100 Гбит/с более жесткие требования к элементной базе системы по поляризационной дисперсии и поляризационным потерям;
- даже при передаче на одной длине волны при скоростях 40 Гбит/с, решаются задачи по изменению требований по хроматической и поляризационной дисперсиям.

Поэтому необходимо более точно определять характеристики Гауссовского импульса.

Известно, что хроматическая дисперсия накапливается с расстоянием и увеличивает групповую задержку (пс/км). Она чувствительна:

- к увеличению длины линии;
- к увеличению скорости передачи.

В системах ВОСП-СР на хроматическую дисперсию оказывают влияние:

- уменьшение шага между каналами,
- увеличение числа каналов.

Поэтому, уточнение исходных данных при большом разнообразии оптических волокон по рекомендации МСЭ-Т G-652 , G-655 позволит более точно рассчитать допустимые длины регенерационных участков при допустимых допусках на величину хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии.

### **1.2 Уточнение исходных данных, связанных с определением хроматической дисперсии в одномодовом оптическом волокне с учетом современных форматов модуляции**

Известно [88], что величина хроматической дисперсии волоконно-оптической линии с учетом аппаратуры определяется в виде трех составляющих:

- дисперсия, вызванная передатчиком,
- дисперсия в оптическом волокне,
- дисперсия приемника оптического сигнала.

Аналогично поляризационная модовая дисперсия определяется:

- передатчиком,
- оптическим волокном,
- усилителями на трассе,
- компенсаторами хроматической дисперсии,
- другими элементами на трассе.

При преобразовании оптическим детектором оптического сигнала в электрический, мощность оптического сигнала преобразуется в напряжение электрического сигнала, при этом  $3\text{дБ}$  потерь мощности оптического сигнала трансформируется в  $6\text{дБ}$  потерь напряжения электрического сигнала. Точка, соответствующая уровню потерь в  $6\text{дБ}$ , традиционно используется для определения ширины полосы пропускания, ограниченной дисперсией. Как известно, под действием оптической мощности в фотодиоде появляется ток, который с помощью усилителей усиливается и преобразуется в напряжение.

В случае длинных линий уровень передаваемой мощности может оказаться недостаточным для достижения минимальной вероятности ошибки BER[88].

Рассматривая распространение гауссовского импульса через оптическое волокно, получим среднеквадратичную длительность импульса в виде:

$$\sigma_2^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2 \quad (1.1)$$

Импульсная характеристика ОВ оценивается значением своей среднеквадратичной длительности, связана с его информационной пропускной способностью соотношением;  $B = 0,25\sigma$

Основываясь на полуширине импульса по уровню интенсивности  $1/e$  от максимального значения  $T_0$ , ряд авторов показывают, что  $T_0 = T_c/2$ , которая связана с полной длительностью по уровню половины максимальной интенсивности:

$$\tau_{\frac{1}{2}} = 2 \cdot \sqrt{\ln \cdot 2 \cdot T_0} = 1,665 \cdot T_0 \quad (1.2)$$

Учитывая понятие времени нарастания импульса, Агравал [13] ввел понятие дисперсионной длины, которая зависит от различных режимов распространения оптических импульсов в оптическом волокне.

Для рассматриваемой амплитуды импульса где  $|A|^2$  представляет оптическую мощность, а  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot c / \lambda_0$  где  $\lambda_0$  – несущая длина волны, мы получаем:

$$B_{нл} = \gamma / A^2, \text{ где } \gamma = 2 \cdot \pi \cdot n_2 / \lambda_0 \cdot A_{эфф}, \text{ где } \gamma = 2,1 \frac{1}{\text{Вт} \cdot \text{км}}, A_{эфф} = 50 - 80 \text{ мкм}^2$$

В конечном результате нелинейное уравнение Шредингера будет содержать 3 составляющие:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{i \cdot \beta_2}{2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i \cdot \gamma \cdot |A|^2 \cdot A - \frac{\alpha}{2} \cdot A \quad (1.3)$$

Таким образом на деградацию сигнала оказывает влияние в одномодовом оптическом волокне хроматическая дисперсия, нелинейные эффекты и затухание сигнала.

Воспользовавшись уравнением (1.3), получим:

$$i \cdot \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \cdot \alpha \cdot A + \frac{1}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma \cdot |A|^2 \cdot A \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания сигнала в оптическом волокне;

$A$  – медленно изменяющаяся амплитуда огибающего импульса;

$T$  – время, измеряемое в системе отсчета, движущейся с импульсом с его групповой скоростью  $U_{gp}$ , т.е.  $T = t - \frac{z}{U_{gp}}$ ;

$\gamma$  - нелинейный коэффициент, определяемый эффектом Керра, представлен выражением:

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega_0}{c \cdot A_{эфф}} = \frac{2\pi \cdot n_2}{\lambda \cdot A_{эфф}} \quad (1.5)$$

где  $A_{эфф}$  - эффективная площадь моды, которая вычисляется выражением:

$$A_{эфф} = \pi \cdot w^2 \text{ для Гауссовской моды}$$

$n_2$  - нелинейный коэффициент преломления (принятый  $2,6 \cdot 10^{-16} \frac{см}{Вт}$ )

$\lambda$  - длина волны;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\omega_0$  - угловая частота

При известном решении для Гауссовского импульса:

$$\tau = \frac{\tau_1}{T_0} = \frac{t - \frac{1}{U_{\text{гр}}}}{T_0} \quad (1.6)$$

вводим нормированную амплитуду:

$$A(z, \tau) = \sqrt{P_0} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot z}{2}\right) \cdot M(z, \tau) \quad (1.7)$$

где  $P_0$  - мгновенная мощность начального импульса

В результате решений получаем два важных параметра: дисперсионную длину по хроматической дисперсии:

$$L_{\text{д}} = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (1.8)$$

для прямого детектирования, т.е. для формата модуляции NRZ и нелинейную длину:

$$L_{\text{нл}} = \frac{1}{\gamma \cdot P_0} \quad (1.9)$$

где  $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$ , -параметр хроматической дисперсии, (пс/нм·км)

где  $\beta_2$  - дисперсия групповых скоростей ( $\frac{nc^2}{км}$ )

$$n_2 = 2,6 \cdot 10^{-16} \frac{см^2}{Вт}; \quad A_{\text{эфф}} = 80 мкм^2;$$

$$\gamma = 1,32 \frac{1}{Вт \cdot км} \text{ для } \lambda = 1,55 мкм \quad (\beta_2 = 21,7 \frac{nc^2}{км});$$

$$D = 17 \frac{пс}{нм \cdot км}$$

При математическом описании эффекты дисперсии в световоде учитываются разложением постоянной распространения моды  $\beta$  в ряд Тейлора вблизи несущей  $\beta$ :

$$\beta(\omega) = n(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \cdot (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1.10)$$

где

$$\beta_m = \left[ \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

Огибающая импульса движется с групповой скоростью ( $v_g = 1/\beta_1$ ), а параметр  $\beta_2$  определяет уширение импульса. С показателем преломления  $n$  и его производными параметры  $\beta_1$  и  $\beta_2$  связаны соотношениями:

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \cdot \left( n + \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g} \quad (1.11)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \cdot \left( 2 \cdot \frac{dn}{d\omega} + \omega \cdot \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \approx \frac{\omega}{c} \cdot \frac{d^2n}{d\omega^2} \approx \frac{\lambda^3}{2 \cdot \pi \cdot c} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (1.12)$$

$$\beta_3 = \frac{S}{\left( -\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{d\lambda^2} \right)^2} \quad (1.13)$$

где  $n_g$  – групповой показатель преломления.

Расчеты  $\frac{2\pi c}{\lambda^2}$  для различных  $\lambda$  приведены в таблице 6. Значения остальных параметров взяты из таблицы 1.6.

Таблица 1.6 Зависимость  $2\pi c/\lambda^2$  от  $\lambda$

$\lambda, \text{нм}$	1260	1360	1460	1530	1550	1565	1625	1675	1700
$\frac{2\pi c}{\lambda^2}$	1,187	1,02	0,884	0,805	0,784	0,77	0,713	0,67	0,652
$(2\pi c/\lambda^2)^2$	1,409	1,04	0,781	0,648	0,615	0,593	0,508	0,449	0,425

Таблица 1.7. Характеристики ОБ

Тип ОБ	G-652A	G-652B	G-652C	G-652D	G-655A	G-655B	G-655C
$\alpha, \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$ $\lambda = 1550 \text{ нм}$	0,4	0,35	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35

$\lambda = 1625 \text{ нм}$	-	0,4	0,4	0,4			
$D, \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$ $\lambda = 1550 \text{ нм}$	16 - 18	16 - 18	16 - 18	17	2 - 6	4 - 8	4 - 8
Наклон дисперсионной характеристики, $\frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$	0,07	0,09	0,07	0,07	0,09	0,05	0,06
$A_{\text{эфф}}, \text{мкм}^2$	80	80	85	80 - 90	72	55	60
$\text{ПМД}, \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$	0,5	0,2	0,5	0,2	-	0,5	0,2

Таблица 1.8. Дисперсионные характеристики D и ПМД различных ОВ

Тип ОВ	$A_{\text{эфф}}, \text{мкм}^2$	$\lambda_{\text{зД}}, \text{мкм}$	$D, \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$ (С – диапазон)	$S \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$ ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-652 Corning	80	1,302 – 1,322	16 - 19	0,09    0,5
G-652 AllWave Lucent	80	1,3 – 1,322	17 - 20	0,088    0,2
Alcatel Color Lock	80	1,3 – 1,32	16-19	0,09    0,2
G-652 Corning	101	1,3 -1,31	18 – 20	0,06    0,2

VasCode				
G-655 True-Wave-RS	50	1,47 – 1,49	2,6 – 6	0,05 0,5
G-655 Corning LEAF	72	1,49 – 1,5	2 – 6	0,06    0,2
G-655 Lucent TrueWave XL	72	1,57 – 1,58	1,4 – 1,6	0,112    0,2
G-655 Alcatel TeraLight	65	1,44 – 1,45	5.5 - 10	0,058    0,2

Значения  $T_0, \beta_2, T_1, L_D$  приведены в таблице 1.9 для различных скоростей передачи и импульсов Гауссовской формы для уточненных расчетных данных (учитывается только хроматическая дисперсия).

Таблица 1.9 Значение характеристик ОВ для различных скоростей передач

Скорость передачи, Гбит/с	STM-64 , 10		STM-256, 40		STM, 100	
	G-652	G-655	G-652	G-655	G-652	G-655
$T_0, nc$	35,4		8,84		3,54	
$T_1, nc$ $\frac{1}{2}$	58,9		14,7		5,89	
G-652 $\beta_2 = 21,7 nc^2 / км$ при $D = 17 \frac{пс}{нм \cdot км}$ $\lambda = 1,55 мкм$ G-655 $\beta_2 = 4,5 nc^2 / км$	21,7		21,7		21,7	



$D = 3,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$		4,5		4,5		4,5
$L_D, \text{км}$	57,7	278,5	3,6	17,4	0,576	2,78

Рассмотрим режим для конкретной системы передачи и оптического волокна. Выберем скорость передачи  $V = 40$  Гбит/с и ОВ G-652D по рекомендации МСЭ-Т. Определим рекомендованные параметры по хроматической дисперсии:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} = \frac{0,125 \cdot T_6^2}{|\beta_2|} = 0,361 \cdot T^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot |\beta_2| \quad (1.14)$$

Для скорости передачи 40 Гбит/с битовый период составляет 25пс, в этом случае:

$$T_0 = \frac{T_6}{2\sqrt{2}} = 8,84 \text{ пс} \quad (1.15)$$

$$\delta = \frac{T_0}{\sqrt{2}}, \text{ пс} \quad (1.16)$$

Параметр дисперсии  $D = 17 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$  при  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$

Учитывая соотношение:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \text{ определим } \beta_2:$$

$$-\beta_2 = \frac{D\lambda^2}{2\pi c} = -21,7 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$$

Для передачи сигнала на одной длине волны:

$$\lambda = 1,55 \text{ мкм}, \beta_2 = -21,7 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}, P_0 = 1 \text{ мВт}$$

$$L_D = 3,6 \text{ км}$$

В результате получим, что

$$L_{НЛ} > L_\delta; L_\delta < L \text{ и } L_{НЛ} < L$$

$$\frac{L_\delta}{L_{НЛ}} \leq 1$$

При выборе длины  $L > L_\delta$  и  $L > L_{НЛ}$  мы имеем режим, при котором хроматическая дисперсия преобладает и требуется длина  $L$ , определяемая затуханием сигнала, хотя она ограничена хроматической и поляризационной модовой дисперсиями:

$$L = \frac{S - 2 \cdot \alpha_p - S_1}{\alpha_{ов} + \frac{\alpha_{н.с.}}{l_{с.д.}}} = \frac{23,4}{0,275} = 85 \text{ км} \quad (1.17)$$

где  $S$  – энергетический потенциал сигнала аппаратуры (прием-передача), принимаем 27дБ

$\alpha_p$  - затухание разъёмного соединения, принимаем, равным 0,3 дБ ,

$S_1$  - запас на старение и ремонт линии, равный 3 дБ ,

$\alpha_{н.с.}$  - затухание неразъёмного соединения, равное 0,1 дБ ,

$l_{с.д.}$  - строительная длина 2-6км, выбираем 4км,

$\alpha_{ов}$  - затухание оптического волокна  $\frac{\text{дБ}}{\text{км}}$  .

Принимая значение дисперсионной длины  $L_\delta = L$  , получаем дополнительные потери на уширение импульса в пределах 1,5 дБ

Согласно рекомендациям МСЭ-Т, эти потери от дисперсии не должны превышать 1 дБ, это соответствует длине, равной:

$$L = 0,75 \cdot L_d = 3,7 \text{ км} \quad (1.18)$$

При скоростях 40 Гбит/с ОВ G-652D при:

$$L_d = 100 \text{ км} \quad \text{требуется} \quad \beta_2 = 0,59 \text{ пс}^2/\text{км}$$

$$L_d = 60 \text{ км} \quad \text{требуется} \quad \beta_2 = 0,98 \text{ пс}^2/\text{км}$$

При скоростях 100 Гбит/с при

$$L_d = 100 \text{ км} \quad \text{требуется} \quad \beta_2 = 0,1 \text{ пс}^2/\text{км}$$

$$L_d = 60 \text{ км} \quad \text{требуется} \quad \beta_2 = 0,156 \text{ пс}^2/\text{км}$$

Остановившись на одном из этих значений, мы получаем отношение сигнал/шум на выходе фильтра на решающем устройстве при приеме 1 и 0. Эти значения равны 144 и 36, что соответствует 21,6 дБ и 15,6 дБ на выходе электрического преобразователя. Полученные результаты соответствуют формату модуляции NRZ.

Дисперсионная  $L_d$  и нелинейная  $L_{НЛ}$  длины характеризуют длины, на которых дисперсионные и нелинейные эффекты оказывают существенное влияние на распространение импульса по оптическому волокну (ОВ):

$$L_d = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \text{ км} \quad \text{и} \quad L_{НЛ} = \frac{1}{\gamma P_0}, \text{ км}, \quad \text{также} \quad L_d = \frac{T_0}{4} \cdot D \cdot \Delta\lambda \quad \text{при} \quad \Delta\lambda = 0,025 \text{ нм}$$

В этих выражениях:

$T_0$  - полуширина гауссовского импульса по уровню интенсивности  $\frac{1}{e}$  от максимальной его амплитуды, пс;

$\beta_2$  - дисперсия групповых скоростей,  $\frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$ , которая принимает отрицательные значения в диапазоне длин волн от 1,28 мкм до 1,7 мкм; и положительные значения в диапазоне длин волн 0,8 – 1,28 мкм;

Решения приведенного уравнения по распространению импульса в ОВ осуществляется отдельно для дисперсии и нелинейных явлений. Соотношение между длинами ОВ,  $L, L_d, L_{нл}$  определяет преобладание того или иного эффекта.

Учитывая принимаемые для передачи по ОВ системы, необходимо знать конкретные значения  $T_0$  и  $P_0$ , тогда как значения  $\beta_2$  определяется исходя из характеристик ОВ.

Значения первичных модуляционных форматов представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 Значение первичных модуляционных форматов

Вид модуляции	NRZ	RZ (0,5)	RZ (0,33)	RZ (0,66)
$d_M$	1,0	0,5	0,33	0,66

Характеристики системы передачи обычно ограничены либо дисперсией, либо затуханием в ОВ (ограниченная мощность). При организации связи необходимо, чтобы штраф по мощности не превышал 1 дБ. Это соответствует значению:

$$\sigma = \frac{T_6 \cdot d_M}{4} = 0,425 \cdot T_0 \cdot 5 \cdot d_M = 0,707 \cdot T_0 \cdot d_M = \frac{T_6 \cdot d_M}{\sqrt{2}} \quad (1.19)$$

Эти значения соответствуют максимальному пороговому значению вероятности ошибки  $10^{-9}$ . МСЭ-Т принимает для всей системы передачи из конца в конец максимальное значение вероятности ошибки  $10^{-10}$ .

Определим  $T_6$  через  $T_0$ .

$$T_0 = 0,3536 \cdot T_6 \quad (1.20)$$

Отсюда различные значения дисперсионной длины для разных современных форматов модуляции:

Таблица 1.12 Зависимость  $L_d$  от вида модуляции

Вид модуляции	NRZ / DPSK	RZ 50% / DPSK	RZ 66% / DPSK	PLDPS К
$l_d, \text{км}$	$\frac{T_0^2}{ \beta_2 }$	$\frac{0,25T_0^2}{ \beta_2 }$	$\frac{0,449T_0^2}{ \beta_2 }$	$L_d = \frac{T_0^2}{ \beta_2 } 4^2$
	$T_0^2 \cdot 2^2 /  \beta_2 $	$0,25 \cdot T_0^2 \cdot 2^2 /  \beta_2 $	$0,449 \cdot T_0^2 \cdot 2^2 /  \beta_2 $	

При определении дисперсионной длины было доказано, что гауссовский импульс сохраняет свою форму, подчиняясь простому закону, а его длительность увеличивается:

$$T_1 = T_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2} \quad (1.21)$$

Следует отметить, чтобы получить значение потери мощности гауссовского импульса за счет дисперсии, равное 1 дБ, необходимо, чтобы  $z < l_d$ . При этом,  $z = 0,75L_d$ . При потерях мощности 2 дБ за счет ХД допускается  $Z = 1,25L_d$

Отсюда ясно, что при модуляционном формате RZ  $L_{\text{нл}} \gg L_d$  и преобладающее значение имеет хроматическая дисперсия.

Это доказывает более высокую устойчивость к нелинейным эффектам формата RZ, но его низкую эффективность по хроматической дисперсии.

Дисперсионные потери мощности гауссовского импульса для каждого формата можно определить из выражения:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{l_D \cdot d_M^2}\right)^2} = 10 \lg \frac{T_1}{T_0} \quad (1.22)$$

Для того, чтобы получить значение потерь мощности сигнала за счет дисперсии по затуханию в 1 дБ, необходимо, чтобы  $\frac{T_1}{T_0} = 1,26$ , а при 2дБ  $T_1/T_0 = 1,6$

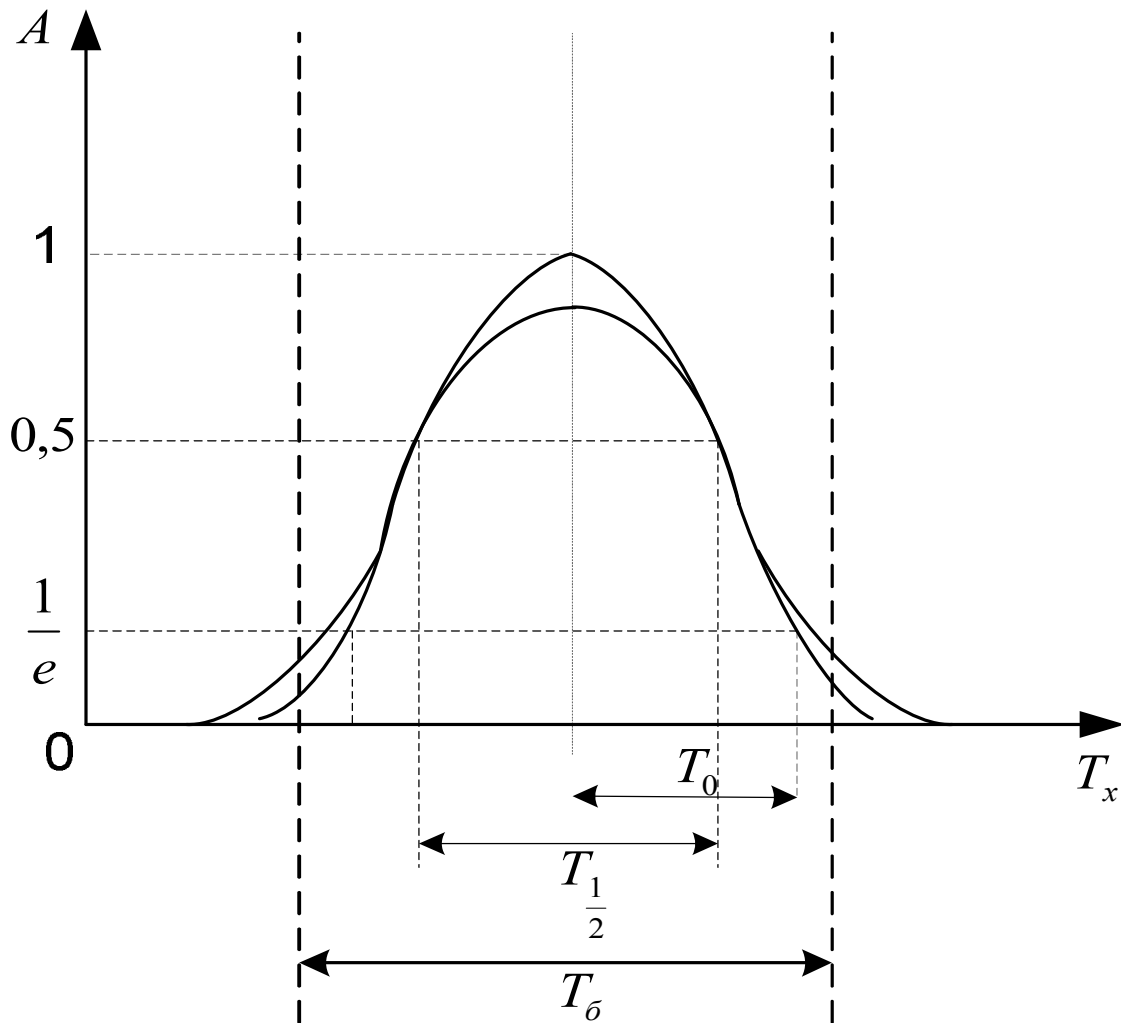


Рис.4 Гауссовский импульс

Сравним полученный результат для формата модуляции NRZ с выражением, полученным Агравалом [19]:

$$b_{\text{yn}} = 10 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{8 \cdot \beta_2 \cdot B^2 \cdot L}{d_M^2}\right)^2} \quad (1.23)$$

$b_{\text{уи}}$ - для узкополосных источников

$$b_{\text{ши}} = 10 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{d_{\text{м}}}{4 \cdot B \cdot D \cdot \Delta \lambda \cdot L} \right)^2} \quad (1.24)$$

$b_{\text{ши}}$  - для широкополосных источников

С учетом ПМД при нашем предложении:

$$b = \frac{T_1}{T_0} = 10 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{8,8 \cdot \beta^2 \cdot B^2 \cdot L}{d_{\text{м}}^2} \right)^2} \quad (1.25)$$

Дисперсионная длина позволяет определить взаимосвязь не только с нелинейной длиной, но и с затуханием. При этом максимум реальной длины ОВ  $z$  при  $L_{\text{д}} = z$  показывает, что уширение импульса составляет  $\frac{T_1}{T_0} = 1,414$ , а потери мощности по дисперсии составляет 1,5 дБ, а при  $T_1/T_0 = 1,6$  потери мощности по ХД составят 2дБ.

При  $\frac{T_1}{T_0} = 2$  потери мощности по дисперсии составляет 3 дБ, что в этом случае недопустимо с точки зрения отношения сигнал\шум в оптическом канале .

Приемник не получит минимально принимаемую мощность и параметр интенсивности шума будет равен 0,25, что превысит допустимое значение  $0,167 = \frac{1}{Q}$ . Большинство приемников работают на квантовом пределе от 20 дБ и выше.

Таким образом, для различных скоростей передачи и различных значений дисперсии для различных ОВ зная минимально допустимое значение параметра Q-фактора и допустимое значение дисперсионной длины легко найти допустимое значение участка регенерации или усиления.

### 1.3 Двухлучепреломление и поляризационная модовая дисперсия. Влияние поляризационной модовой дисперсии на передачу сигнала

Важность [85] поляризации для цифровых высокоскоростных систем на волоконно-оптических линиях связи стала более значимой с внедрением оптических усилителей и других элементов на волоконно-оптических линиях, которые при компенсации затухания и хроматической дисперсии внесли свой вклад в увеличение поляризационной модовой дисперсии и поляризационно-зависимых потерь.

Еще одна причина – это увеличение скорости передачи, которая приводит к необходимости увеличения числа дополнительных элементов и сокращению расстояния между усилителями. Известно, что поляризационно-модовая дисперсия возникает в одномодовом волокне по двум основным причинам (рис. 5):

- незначительные изменения в геометрии оптического волокна (ОВ)
- механические воздействия на ОВ в виде внутренних напряжений, изгибов, скрутки

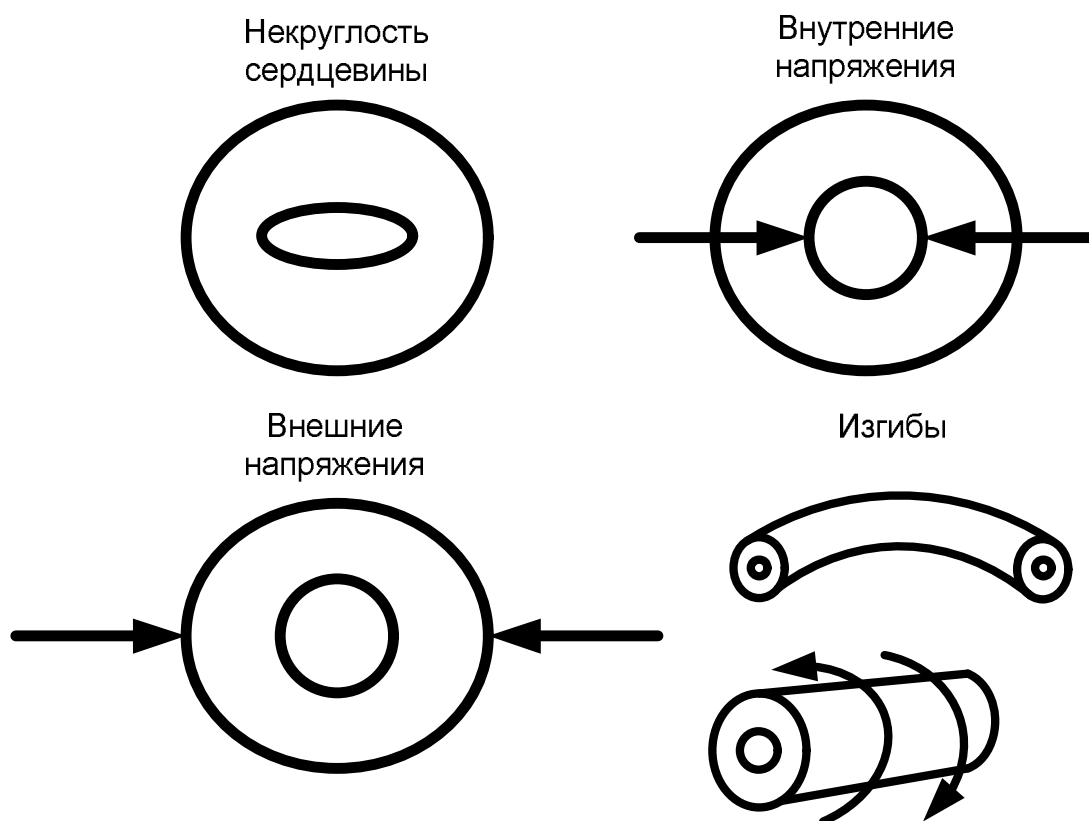
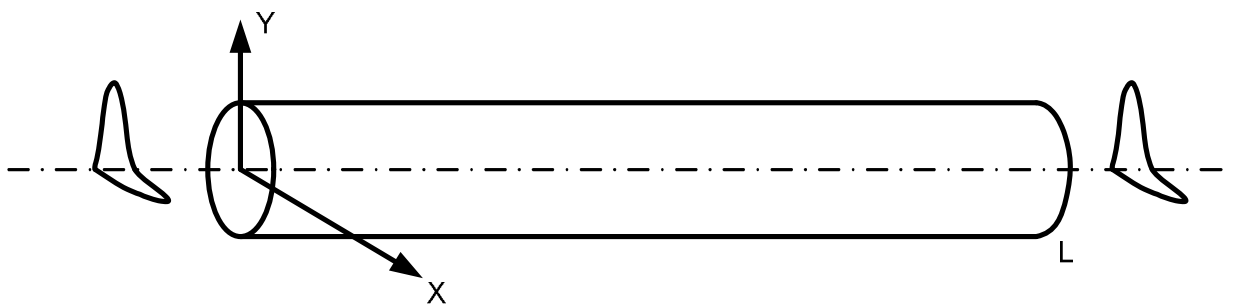




Рис.5 Причины ПМД (причины двулучепреломления)

В результате, в одномодовом волокне возникает две ортогональных моды, которые распространяются с разной скоростью в двух ортогональных направлениях(рис. 6):

- Симметричное одномодовое волокно имеет две вырожденные ортогональные моды:



- Асимметрия оптического волокна, а также внутренние напряжения вызывают Дифференциальную Групповую Задержку (ДГЗ):

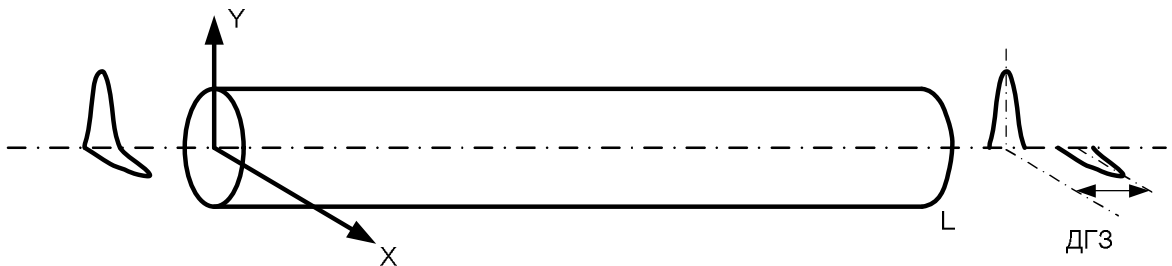


Рис.6 ПМД и ДГЗ

При идеальных условиях совершенной цилиндрической геометрии ОВ и изотропии вещества, та мода, которая возбуждена с поляризацией в направлении X, не будет поддерживать ортогональную у-поляризованную моду. Однако, в реальных условиях, малые отклонения от цилиндрической геометрии и малые флуктуации в анизотропии вещества приводят к смешиванию двух

поляризационных состояний (рис.6) Постоянные распространения  $\beta_x \neq \beta_y$ , то есть показатели преломления  $n_x \neq n_y$ .

Учитывая технологию изготовления ОВ, когда в сердцевину ОВ вносят примеси  $GeO_2$ , даже при идеальной геометрии  $n_x \neq n_y$ . Это свойство называется двулучепреломлением  $B$ :

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{K_0} = |n_x - n_y| \quad (1.26)$$

$B$  - непостоянное число вдоль ОВ и изменяется случайным образом из-за флуктуаций в форме сердцевины и анизотропии, вызываемой статическими напряжениями. При уменьшении  $B$  можно уменьшить поляризационную модовую дисперсию.

Дифференциальная фазовая скорость ограничивает полосу пропускания ОВ за счет уширения импульса и описывается групповым временем задержки (ГВЗ) на единицу длины:

$$\frac{\Delta\tau}{l_k} = \frac{d}{d\omega}(\beta_x - \beta_y) = \frac{\Delta n_n}{c} - \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n_n}{d\omega} \quad (1.27)$$

$\frac{\Delta\tau}{l_k}$  - поляризационная модовая дисперсия (ПМД) ОВ. Это соответствует короткой длине ОВ, на которой двулучепреломление представлено как  $\frac{L}{L_D}$ , где  $L$  - длина линии. Вместе с тем,  $D_{ПМД} < 0,3\sqrt{D}$ , где  $D$  - дисперсионный параметр хроматической дисперсии, связанный с дисперсией групповых скоростей  $\beta_2$ :

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (1.28)$$

где  $\lambda$  - длина волны, мкм

$c$  - скорость света км/с

$\beta_2$  - дисперсия групповых скоростей,  $\frac{nc^2}{км}$

полагается однородным. При этом необходимо знать длину связи  $l_c$  между короткой длиной, где эффекты поляризации - детерминированный процесс, и режимом большой длины, где поляризация становится статистическим процессом.

Битовая длина может быть малой, например,  $1см \cdot c \cdot B \sim 10^{-4}$  и может быть 10м при  $B \sim 10^{-6}$ . Изменение  $B$  приводит к изменению ПМД по длине линии [1]. В этом случае ПМД изменяется пропорционально  $\sqrt{l}$ . Измеренные значения ПМД волокна в оптическом кабеле меняются от кабеля к кабелю и становятся ограничивающим фактором для систем на большие расстояния и с высокими скоростями. По аналогии с технологией дисперсии групповых скоростей Агравал ввел понятие поляризационной длины:

$$L_{ПМД} = \left(x \frac{T_0}{D_p}\right)^2 \quad (1.29)$$

где  $T_0$  - первоначальная ширина импульса, например 10 пс,  $D_\delta$  - коэффициент ПМД, например  $0,1 \frac{nc}{\sqrt{км}}$ .

Спектральную зависимость ПМД вектора можно представить в форме ряда Тейлора:

$$\tau(\omega, z) = \tau(\omega_0, z) + (\omega - \omega_0) \cdot \tau_1(\omega_0, z) + \frac{1}{2} \cdot (\omega - \omega_0)^2 \cdot \tau_2(\omega_0, z) + \dots \quad (1.30)$$

Где  $\tau$  показывает изменение относительно частоты, а  $\tau(\omega_0, z)$  представляет ПМД первого порядка.

Ряд Тейлора по хроматической дисперсии и ПМД показывают аналогию и отличия между ПМД и хроматической дисперсией.

Компенсировать ПМД можно эффективно через  $4L_{\text{ПМД}}$  (очень протяженные линии, например  $L_{\text{ПМД}}=10000$  км), т.е. через 40000 км. Однако, если  $\text{ПМД} = 0,5 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$ , а  $T_0=25$  пс,  $L_{\text{ПМД}}=2500$  км,  $4L_{\text{ПМД}}=10000$  км. Представленное решение относится к случаю, когда отсутствуют элементы на линии, вносящие поляризационно-зависимые потери и усиление. Данное решение относится к двулучепреломлению и ПМД первого порядка. ПМД второго порядка может значительно изменить полученную характеристику в худшую сторону. Вместе с тем, успех техники компенсации зависит от соотношения:

$$\frac{L}{L_D}, \text{ где } L - \text{длина линии.}$$

Явление поляризационной модовой дисперсии создается, как известно, двулучепреломлением, которое кроме внутренних причин (изменение диаметра ОВ, анизотропия за счет примесей и др.) может быть результатом внутренних и внешних воздействий на ОВ. Процесс производства ОКС и строительства связан с уже созданным ОВ и поэтому определяется внешними механическими и температурными воздействиями. При производстве ОКС 4 главных этапа следует выделить: расцветка ОВ, протяжка в модули, армирование сердечника ОКС и наложение оболочки.

При производстве ОКС определялись внутренние механические напряжения для ОВ, и они мало отличались для ОВ. В течение и после каблирования ОВ разница в поляризационной модовой дисперсии «ПМД» сохранялась между ОВ, причем, ОВ с более высокой внутренней ПМД «0,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ » является более чувствительным к внешним напряжениям.

Исследования [1] показали, что для ОВ по рекомендации G-652 МСЭ-Т средние значения ПМД для ОВ, модуля и кабеля составили соответственно: 0,034, 0,025, 0,041 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ . Для ОВ по рекомендации G-655 МСЭ-Т значения более низкие.

При прокладке ОКС с ОВ в одном кабеле по рекомендации G-652 и G-655 применяли укладку в грунт и в канализацию. Строительные длины составляли 2 км. Были испытаны 5 кабельных секций, каждая длиной 40 км. После прокладки не было отмечено значительных изменений ПМД для ОВ по рекомендации G-655. Для ОВ по рекомендации G-652 результаты измерений ПМД приведены в таблице 1.13.

Таблица 1.13. Одномодовое ОВ в кабеле и прокладке и его ПМД

Трасса	Метод прокладки	Число ОВ в кабеле	Общая длина	Максимальная ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$	Средняя ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$
1	Канализация	32	70	0,173	0,033
2	Канализация и грунт	64 24	200	0,149	0,035
3	Канализация	64	70	0,15	0,02

Таблица 1.14 Температурные изменения оказали воздействие на ПМД для ОВ G-652

Т°С	-20	-40	70	20
ПМД	0,02	0,024	0,026	0,027

По результатам испытаний оказалось, что ОВ с низким внутренним ПМД имеет высокую сопротивляемость внешним воздействиям как механическим, так и температурным. Это относится как к ОВ по рекомендации G-652 так и G-655.

Кабели с низким ПМД – это кабели с оптическими волокнами с низким водяным пиком на длине волны 1,383 мкм и слабо чувствительные к изгибам. Несомненно, к этим волокнам относятся ОВ по рекомендации G-652 В/D и G-657 А/В, которые соответствуют рекомендации G-652 D Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т). Применение таких кабелей становится все более актуальным в свете их внедрения на сети доступа к абоненту с большой емкостью ОВ в кабеле. Известно, что ПМД изменяется по двум причинам:

- создаваемыми

- внутренним и внешним двулучепреломлением

Внутренняя причина зависит от завода-изготовителя волокна. Внешние воздействия на двулучепреломление доминируют при создании конструкции оптического кабеля (ОК) при скрутке, изгибах и статических напряжениях на волокнах. Внутренние воздействия на двулучепреломление, вызванные некруглостью сердцевины и внутренними напряжениями могут быть устранены:

- подкруткой волокна при вытяжке
- применением кварцевой сердцевины без добавок  $GeO_2$

Статистические факторы:

- несовершенство вытяжки ОВ,
- скрутка ОВ при изготовлении ОК,
- изгибы ОК: механические деформации ОВ проложенного ОК.

Динамические факторы:

- изменение температуры окружающей среды для ОК в грунте,

Динамические деформации ОВ (ветровые нагрузки, изменения температуры, деформации при гололеде на ОК) для подвесных ОК.

Исходя из теории распространения импульса, в ОВ с поляризационной модовой дисперсией, было предложено учитывать две ортогональные моды в составляющей электрического поля  $E(z,t)$ :

$$E(z, t) = A_1(z, t) \cdot e_1 \cdot ei(\omega_0 \cdot t - \beta_{0z}) + A_2(z, t) \cdot e_2 \cdot ei(\omega_0 \cdot t - \beta_{0z}) \quad (1.31)$$

$e_1$  и  $e_2$  два ортогональных единичных вектора, а  $t$  – переменная времени.

Используя преобразование Фурье, получим

$$E(z, \omega) = A_1(z, \omega - \omega_0) \cdot e_1 \cdot e(-i\beta_{0z}) + A_2(z, \omega - \omega_0) \cdot e_2 \cdot e(-i\beta_{0z}) \quad (1.32)$$

$E(z, \omega)$  – удовлетворяет уравнению Максвелла.

$$\frac{d^2 E(z, \omega)}{dz^2} + \omega^2 \mu \varepsilon(z, \omega) \cdot E(z, \omega) = 0 \quad (1.33)$$

Для гауссовского импульса шириной  $T_0 = \frac{T_6}{\sqrt{2}}$  с  $p(0, T) = e(-\frac{1}{2}(\frac{T}{T_0})^2)$

Выходной импульс  $p(z, T)$  через преобразование Фурье будет иметь вид:

$$P(0, \omega) = T_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot e \left( -\frac{1}{2} \cdot \omega^2 \cdot T_0^2 \right) \quad (1.34)$$

В результате дальнейших преобразований (37) получим:

$$P(z, T) = \left( \frac{1/\sqrt{D_z}}{T_0^2} + 1 \right) \cdot e \cdot \left( -1/2 \cdot \frac{T_1^2}{D_z} + T_0^2 \right) \quad (1.35)$$

где  $\sqrt{D_z} = \text{ПМД пс}/\sqrt{\text{км}}$ .

Ширина гауссовского импульса будет равна  $\sigma^2 = T_0^2 + \text{ПМД}^2$

$$\text{и } \sqrt{D_z} = \sqrt{x \cdot \beta_2 \cdot z}$$

Дифференциальная групповая задержка непостоянная величина и изменяется во времени случайным образом. Эта величина подпадает под распределение Максвелла и среднеквадратичное отклонение связано со средним значением ДГЗ соотношением:

$$\sigma \cdot \tau^2 = 3 \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \text{ДГЗ}_{\text{максв}}^2 \quad (1.36)$$

$$\text{ПМД} = \sqrt{\text{ДГЗ}^2} \quad (1.37)$$

Для нечирпированного импульса:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + r_0(1 - r_0) \cdot \text{ДГЗ}^2 \quad (1.38)$$

Для наихудшего случая  $r_0 = 0,5$ .

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + 0,25 \cdot \text{ДГЗ}^2 \quad (1.39)$$

Для Максвелловского распределения ДГЗ =  $x \cdot \text{ПМД}$  при ДГЗ =  $1 \cdot \text{ПМД}$  составляет 39% при ДГЗ =  $2 \cdot \text{ПМД}$  составляет всего 0,7%, а при ДГЗ =  $4 \cdot \text{ПМД}$  – уже  $10^{-10}$ .

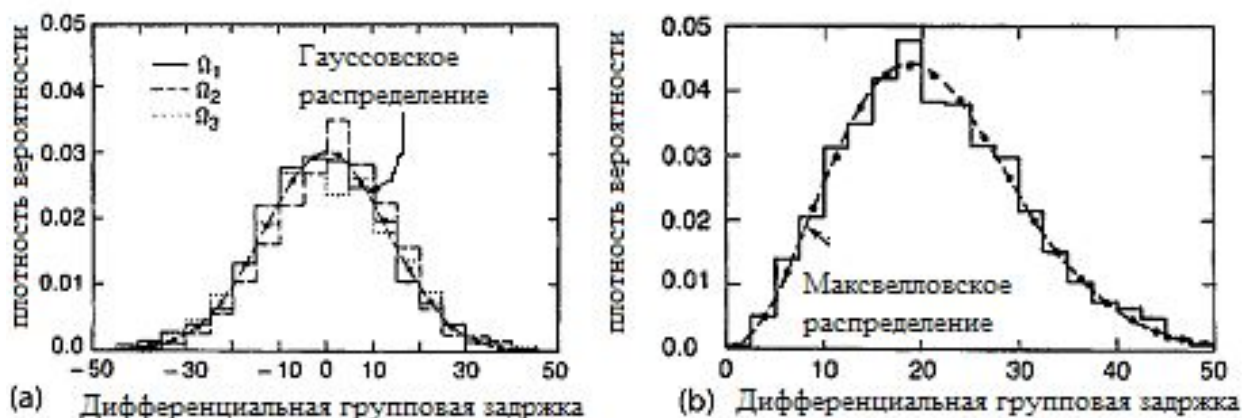


Рис.7. Распределение векторных составляющих подчиняется распределению Гаусса, а распределение дифференциальной групповой задержки – распределению Максвелла.

Если рассматривать кабельную линию, состоящую из строительных длин и соединительных муфт, то ПМД за счет двулучепреломления определяется значениями, полученными для рассматриваемого типа волокна (таблица 1.15):

Таблица 1.15 ПМД в ОВ

Тип волокна	ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$ <sub>max</sub>
G-652-A	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-652-B	0,2 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-652-C	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-652-D	0,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-653-A	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-653-B	0,2 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-654-A	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-654-C	0,2 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-655-A, B	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
G-655-C	0,2 пс/ $\sqrt{\text{км}}$

Изменение ДГЗ описывается функцией вероятностной плотности Максвелла. ПМД – это величина средняя от величины ДГЗ в рассматриваемом



диапазоне длин волн и нормализована зависимостью от длины как корень квадратный. Разброс характеристики ПМД лежит в пределах  $\pm 15\%$ . Ясно, что в кабеле ПМД значительно меньше, чем на линии порядка в 5-6 раз, так как на линии применяются элементы, которые сами вносят значительные изменения в ПМД, такие как коннекторы, муфты, усилители, компенсаторы дисперсии и другие элементы линии. Учитывая сложный статистический характер ПМД, следует обратить внимание на то, что при уширении за счет ПМД теряется мощность сигнала. Обычно принимается ограничение как штраф по мощности за счет ПМД, равный 1 дБ.

Для систем передачи со спектральным разделением требуется величина меньше 0,04 мин/год/линия. Это соответствует вероятности  $1,3 \cdot 10^{-7}$  из конца в конец, когда ДГЗ будет превышать допустимый уровень. С увеличением скорости передачи до 10-40 Гбит/с ПМД играет существенную роль в ограничении внедрения систем передачи на большие расстояния. Ранее определялось, что ширина полосы ПМД обратно пропорциональна ДГЗ. Для малого значения ДГЗ существует большая вероятность корреляции одного канала с соседним каналом, чем при большом значении ДГЗ. Чтобы определить независимость канала необходимо определять корреляцию ширины полосы  $\Delta\lambda_c$ . Если корреляция ширины полосы по уровню 0.5 короче расстояния между каналами, все каналы независимы. Если корреляция ширины полосы ( $\Delta\lambda_c$ ) больше расстояния между каналами, то каналы зависимы от ПМД. Если вероятность простоя канала дается значением  $K$ , а число спектральных каналов  $N$ , то при независимости каналов вероятность простоя равна  $KN$ . Если каналы зависимы от  $\Delta\lambda_c$  и канального расстояния  $q_x$ , то вероятность простоя увеличится на значение:

$$P_{\text{простоя}} = K \cdot N \cdot R \quad (1.40)$$

$$\text{где } 2 > R > 1$$

Учитывая, что ПМД может быть меньше нормы  $0,1T_6$ , вводится понятие длины диффузии  $l_D$ , которая равна:

$$l_D = \frac{1}{(\text{ПМД} \cdot \Delta\lambda)^2} \quad (1.41)$$

где ПМД – это значение ПМД в кабеле пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ;

$\Delta\lambda$  - расстояние между каналами, например, 50 ГГц

Эта длина изменяется от 100 до 5000 км и зависит от значения ПМД и значения  $\Delta\lambda$ . Воздействие ПМД на соседние каналы сказывается: на ухудшении параметра Q-фактора, джиттера и ряда других характеристик.

Как определиться с элементарным кабельным участком, учитывая его разные длины, ориентируясь на решение МСЭ:

1. Необходимо определить значение  $\text{ПМД}_Q$  исходя из количества строительных длин

$$\text{ПМД}_{Q_{\text{э.у.}}} = \sqrt{\frac{\text{ПМД}_1^2 \cdot l_1 + \text{ПМД}_2^2 \cdot l_2 + \dots + \text{ПМД}_n^2 \cdot l_n}{l}}, \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}} \quad (1.42)$$

где  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_n$  - строительные длины кабеля на элементарном кабельном участке, км

$l$  - длина элементарного кабельного участка, км.

Вместе с тем, элементарными кабельными участками может быть и линия без промежуточных усилителей и компенсаторов хроматической дисперсии длиной 40-100 км. Даже в этом случае суммирование со значением хроматической дисперсии не дает никакой прибавки и не дает возможности правильно оценить воздействие поляризационной дисперсии на передачу. Согласно МСЭ-T (документ G-691) полной дисперсии отводится значение с учетом системы передачи, равное  $0,3T$ , где  $T$  – битовый период, причем на хроматическую дисперсию кабеля отводится  $0,25T$ , а на дисперсию ПМД отводится  $0,1T$  системы из конца в конец с учетом промежуточных усилителей, компенсаторов и других элементов, при этом учитывается фактор распределения Максвеллиана, равный 3.

Функциональные требования для работы системы определяются с учетом ПМД волокно/кабель на основании выражения:

$$\text{ПМД}_{\text{системы}} = \sqrt{\frac{\text{ПМД}_Q^2 \cdot l_1 + n_1 \cdot \text{ПМД}_y^2 + n_3 \cdot \text{ПМД}_k^2}{l}}, \text{ где } l_1 < l \quad (1.43)$$

$l_1$  – длина кабеля

$$l = l_1 + n \cdot l_k - \text{общая длина линии с учетом компенсаторов дисперсии}$$

$$\text{ПМД}_{\text{системы}} = 0,1 \cdot T \quad (1.44)$$

где  $T$  – битовый интервал системы

Рассматривая ПМД выше, мы имеем в виду ПМД, которая определяется двулучепреломлением. ПМД2 – определяется источником излучения широкополосным или узкополосным. Ясно, что широкополосный источник приводит к увеличению хроматической дисперсии на величину, зависящую от ПМД1 и от длины линии:

$$\text{ПМД2} \cong \frac{(\text{ПМД1})^2}{\sqrt{3}} \quad (1.45)$$

Для узкополосных источников с ПМД2 можно не считаться при скорости передачи 10 Гбит/с. Кроме того, для компенсированной нечирпированной системы передачи ПМД2 становится незначительной.

Ширина полосы ПМД обратно пропорциональна ДГЗ. ДГЗ по норме равна 0,1Т. При скорости передачи 10 Гбит/с ширина полосы должна быть меньше 100 ГГц. При увеличении полосы возникают воздействия на соседние каналы ПМД. На рис.8 приведены результаты расчета ПМД ОВ линии без учета компонентов, имеющих определенные значения ПМД, и ОВ линии с учетом компонентов ПМД.

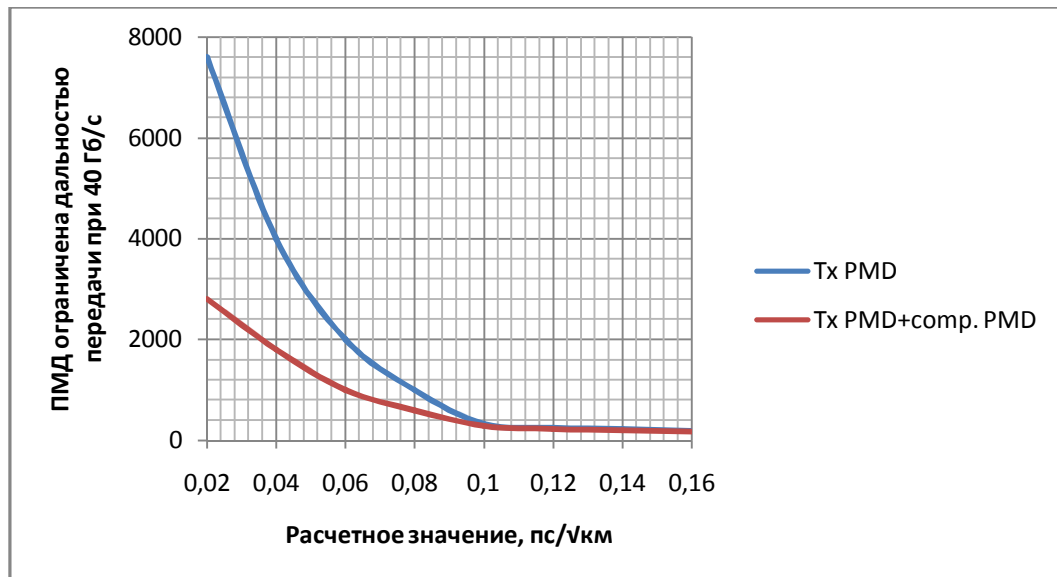


Рис.8 Значения ПМД для  $V=40$  Гбит/с и длина линии пс/ $\sqrt{\text{км}}$

PMD – серьезное ограничение для быстродействующей передачи данных. PMD вызвана небольшим двулучепреломлением волокна и других компонентов линии передачи. Это приводит к расширению и деполяризации оптических импульсов. В отличие от ХД компенсацию PMD выполнять намного труднее из-за того, она недетерминированно изменяется по времени и длине волны. Даже для оптоволоконной линии связи с низким PMD, то есть с достаточно низкой средней дифференциальной групповой задержкой (DGD), мгновенные значения DGD могут превысить допустимые пределы и вызвать отказ системы, если значение PMD оптоволоконной линии связи выше, чем приблизительно  $0,1T_B$ . Здесь  $1/T_B$  – символьная скорость передаваемого (мультиплексного) сигнала данных. Это показано, что PMD становится серьезным препятствием при реализации высоких скоростей данных.

#### 1.4 Решения, полученные ранее и нормы на поляризационную модовую дисперсию

##### 1.4а Решения, рекомендованные Фриманом.

Согласно Фриману[45] поляризационная модовая дисперсия вызывает межсимвольную интерференцию. Оценка этого явления – ухудшение показателей системы примерно на 1 дБ с учетом хроматической дисперсии при  $0,3T_B$ , а в худшем случае и при  $0,4T_B$ . Доля ПМД составляет  $0,1T_B$ . Компьютерное

моделирование показывает, что если ПМД имеет Максвелловское распределение со средним значением не выше  $0,1T_6$ , то с вероятностью меньшей, чем  $10^{-9}$  ухудшение показателей системы не превысит 1дБ. Эффект второго порядка ПМД объединяет ПМД и ХД.

Влияние ПМД возрастает согласно Фриману:

- с увеличением скорости передачи в канале,
- с увеличением длины линии (числа усилителей и компенсаторов ХД),
- с увеличением числа каналов (ВОСП-СР).

ПМД может быть уменьшена при жестком контроле при производстве ОВ, что уже и сделано.

Суммарная дисперсия: хроматическая и поляризационная модовая дисперсия – могут составлять  $0,4T_6$ , тогда как ПМД составляет  $0,1T_6$ . Если исходить из этих соображений  $D_{хд} = 0,3873 T_6$

Это соответствует решению:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,387 \cdot T_0 \quad (1.46)$$

$$\text{при } L/L_d = 0,9616$$

С учетом ПМД  $L/L_d = 0,98$

$$\sigma = T_6 \sqrt{0,25^2 + 0,1^2} = 0,269 \cdot T_6 = 0,76 \cdot T_0 \quad (1.47)$$

$$\text{в этом случае } \frac{T_1}{T_0} = 1,256 - 1\text{дБ}$$

#### 1.46 Решения по Убайдуллаеву

Согласно решениям Убайдуллаева [24, 29, 61]:

Дисперсия определяется:

$$D = \sqrt{D_{\text{мод}}^2 + (D(\lambda) \cdot \Delta\lambda)^2} \quad (1.48)$$

удельная полоса пропускания:

$$W=0,44/D \quad (1.49)$$

Определив хроматическую дисперсию, определим поляризационную модовую дисперсию:

$$\text{ПМД} = 0,5 \cdot \sqrt{D_{\text{хд}}} \quad (1.50)$$

Непонятно на какие нормы ориентируется автор, какое значение ПМД допустимо и правильно ли ПМД определена. Так у рассматриваемого автора  $\text{ПМД} = 0,5 \cdot \sqrt{D_{\text{хд}}}$  пс, тогда как в монографии [1]:

$$\text{ПМД} = 0,3 \cdot \sqrt{D_{\text{хд}}}, \text{ пс}/\sqrt{\text{км}} \quad (1.51)$$

Согласно проведенным расчетам правильнее было бы записать полученное решение в настоящей работе:

$$\text{ПМД} = (0,3 - 0,4) \cdot \frac{\sqrt{D_{\text{хд}} \cdot L_d}}{L_{\text{ПМД}}}, \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}} \quad (1.52)$$

#### 1.4в Решения по Каминову

Более современный подход к решению влияния ПМД реализует Каминов [52, 98]. Он предложил норму по ПМД, вклад которой не превышал вносимых потерь не более 1 дБ.

$$\sigma = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta T_{\text{avg}}}{4} \quad (1.53)$$

$$\Delta T_{\text{avg}} = \text{PMD} \cdot \sqrt{L} \quad (1.54)$$

$$\Delta T_{\text{avg}} < 0,15 \cdot T_6 \quad (1.55)$$

$$L_{\text{ПМД}} = 0,02 \cdot \frac{T_6^2}{\text{ПМД}^2} = (0,141 \cdot T_6 / \text{ПМД})^2 \quad (1.56)$$

Согласно документу МСЭ-Т G- 691 допустимая норма на ПМД не должна превышать  $0,1T_0$  или  $0,2828T_0$ .

Решая задачи, связанные с ПМД и её нормами, авторы не увязывают эти решения с нормами на хроматическую дисперсию.

#### 1.4г Решения, полученные Агравалом

Агравалом [8] получено выражение для допустимого изменения гауссовского импульса по ПМД:

$$\sigma^2(\text{пмд}) = \frac{1}{4} \cdot \left( \sqrt{\Delta\tau^2(\text{пмд}) - T_0^2 \cdot \frac{(1 + 2 \cdot \Delta\tau^2(\text{пмд}))}{3 \cdot T_0^2}} - 1 \right) \quad (1.57)$$

$$1) \Delta\tau(\text{пмд}) = D_p \cdot \sqrt{Z} = 0,1 \cdot T_0$$

Здесь  $\Delta\tau(\text{пмд})$  – среднее значение ПМД пс,  $T_0$  – полуширина гауссовского импульса по уровню  $1/e$ , пс.

В результате получаем  $\sigma(\text{пмд}) = 0,375 T_0 = 0,1325T_0$

2) Принимаем  $\Delta\tau(\text{пмд}) = T_0$ . В результате получаем  $\sigma(\text{пмд}) = 0,145T_0$ .

$$L_{max} = \left( \frac{\tau_{max}}{\text{ПМД}} \right)^2 \quad (1.58)$$

Согласно полученным ранее решениям задержка сигнала по хроматической дисперсии составляет  $0,25T_0$ , а задержка по ПМД имеет два подхода:

$$\text{Первый} - 0,1 \cdot T_0 \text{ (МСЭ - Т)} \quad \tau_{max} = \sqrt{(0,25 \cdot T_0)^2 + (0,1 \cdot T_0)^2} = 0,27 \cdot T_0 \quad (1.59)$$

Второй- $0,15 \cdot T_0$  (Каминов, Агравал)

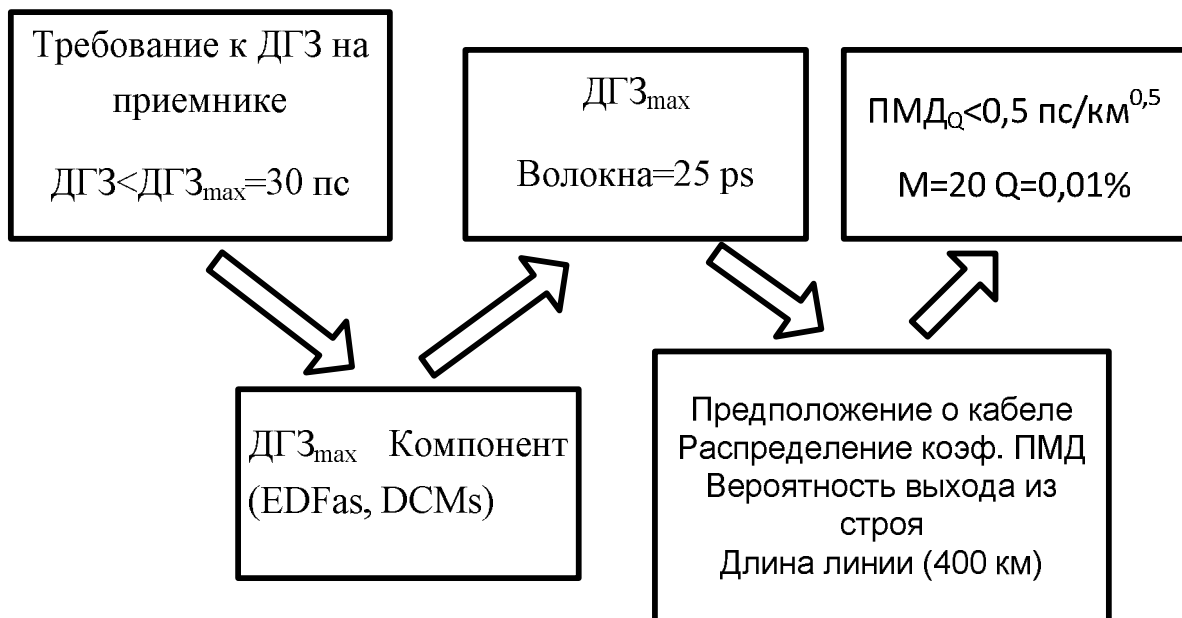
$$\tau_{max} = \sqrt{(0,25 \cdot T_0)^2 + (0,15 \cdot T_0)^2} = 0,3 \cdot T_0 \quad (1.60)$$

#### 1.4д Действующие стандарты по поляризационной модовой дисперсии.

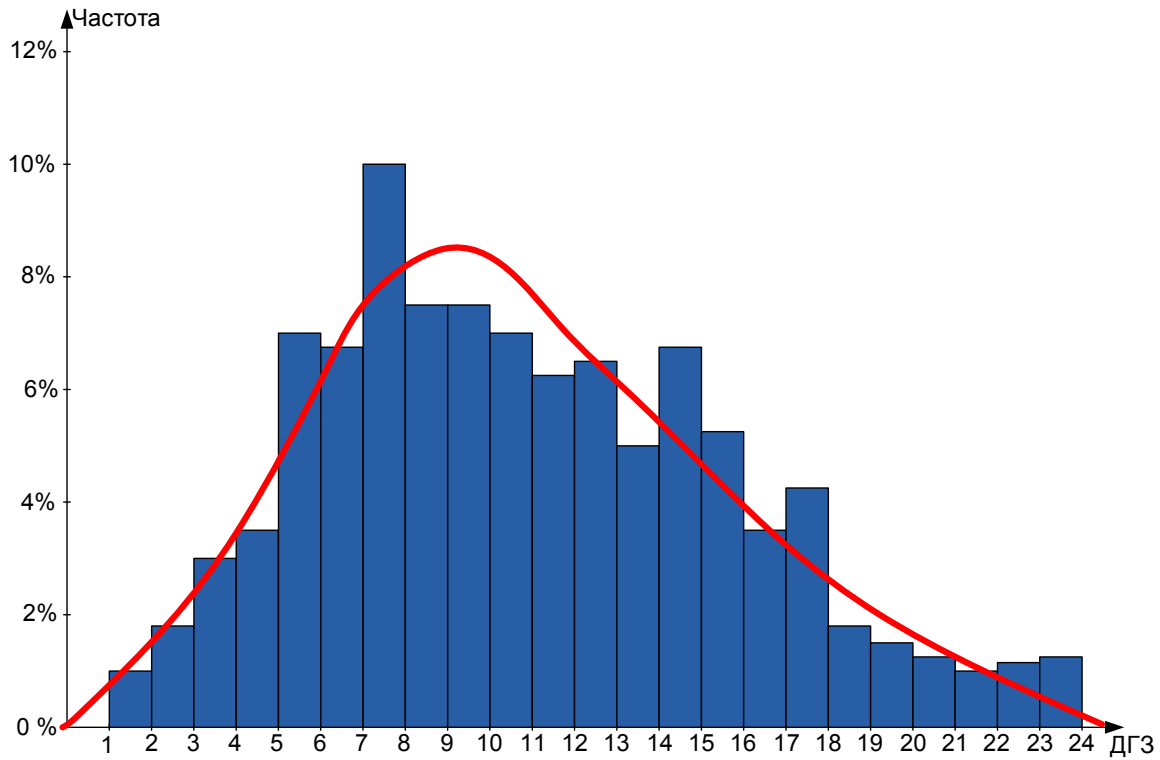
История стандартов по ПМД<sub>Q</sub>:

Рекомендация	Год	ПМД <sub>Q</sub>	Требования
652.В, 653, 654, 655.В	2000	ПМД <sub>Q</sub> <0,5 пс/км <sup>0,5</sup> M=20 Q=10 <sup>-4</sup>	10 Гб/с на расстояние <400 км
652.В, 653.В, 655.С	2003	ПМД <sub>Q</sub> <0,20 пс/км <sup>0,5</sup> M=20 Q=10 <sup>-4</sup>	10 Гб/с на расстояние 2000 км и 40 Гб/с до 250 км
654.В и 654.С	2004	ПМД <sub>Q</sub> <0,20 пс/км <sup>0,5</sup> M=20 Q=10 <sup>-4</sup>	10 Гб/с на расстояние 2000 км и 40 Гб/с до 250 км

Логика построения спецификации ПМД на примере 10 Гбит/с:





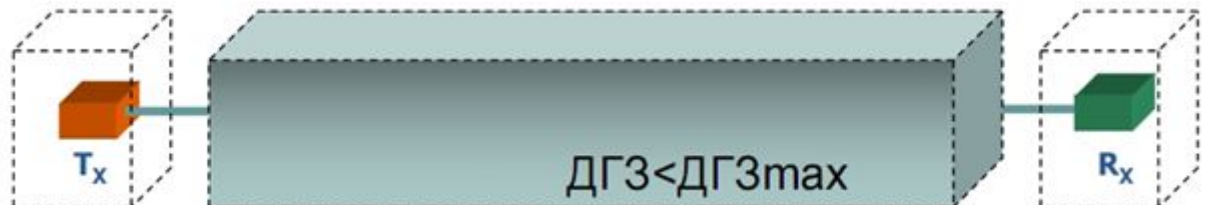


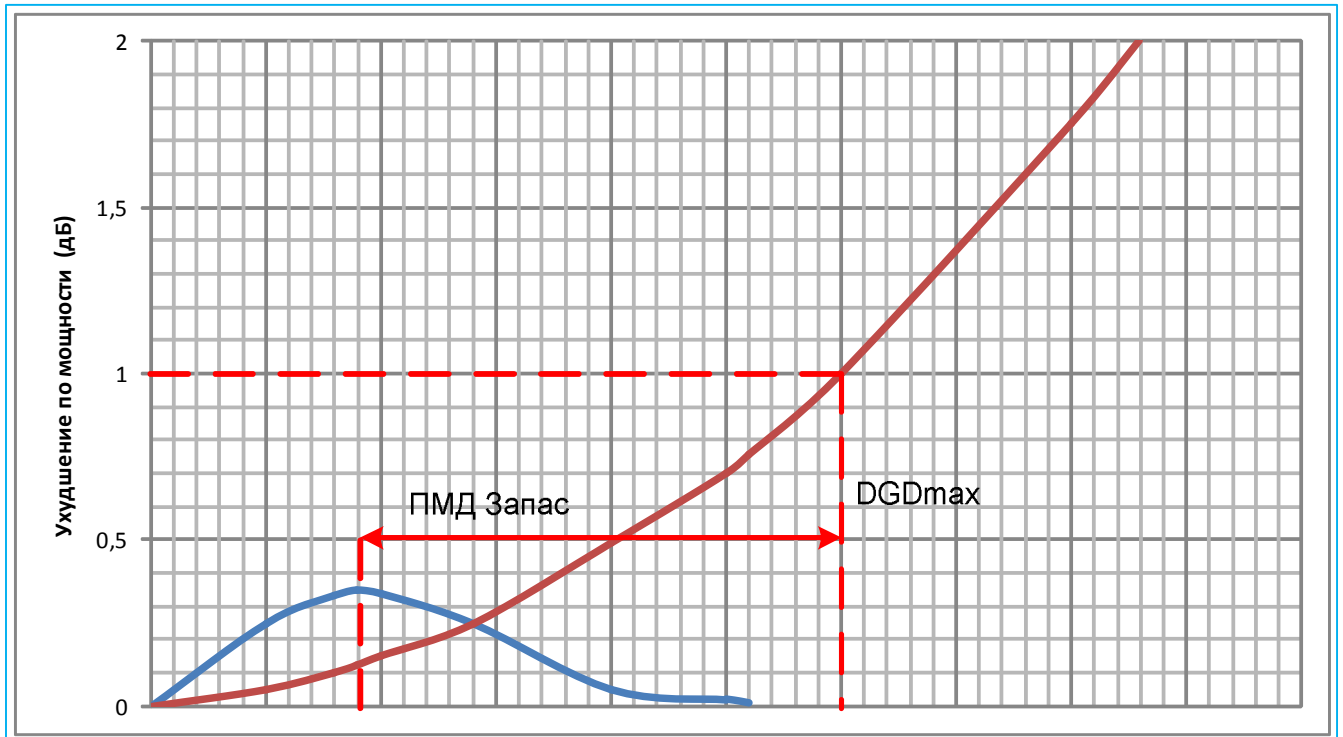
$$P(\Delta\tau) = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta\tau^2}{\Delta\tau^3} \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta\tau^2}{\pi \cdot \Delta\tau^2}\right)$$

$$PMD = \Delta\tau$$

- ДГЗ ( $\Delta\tau$ ) подчиняется распределению Максвелла
- ПМД является средним значением ДГЗ
- ПМД возрастает пропорционально корню квадратному из длины волокна

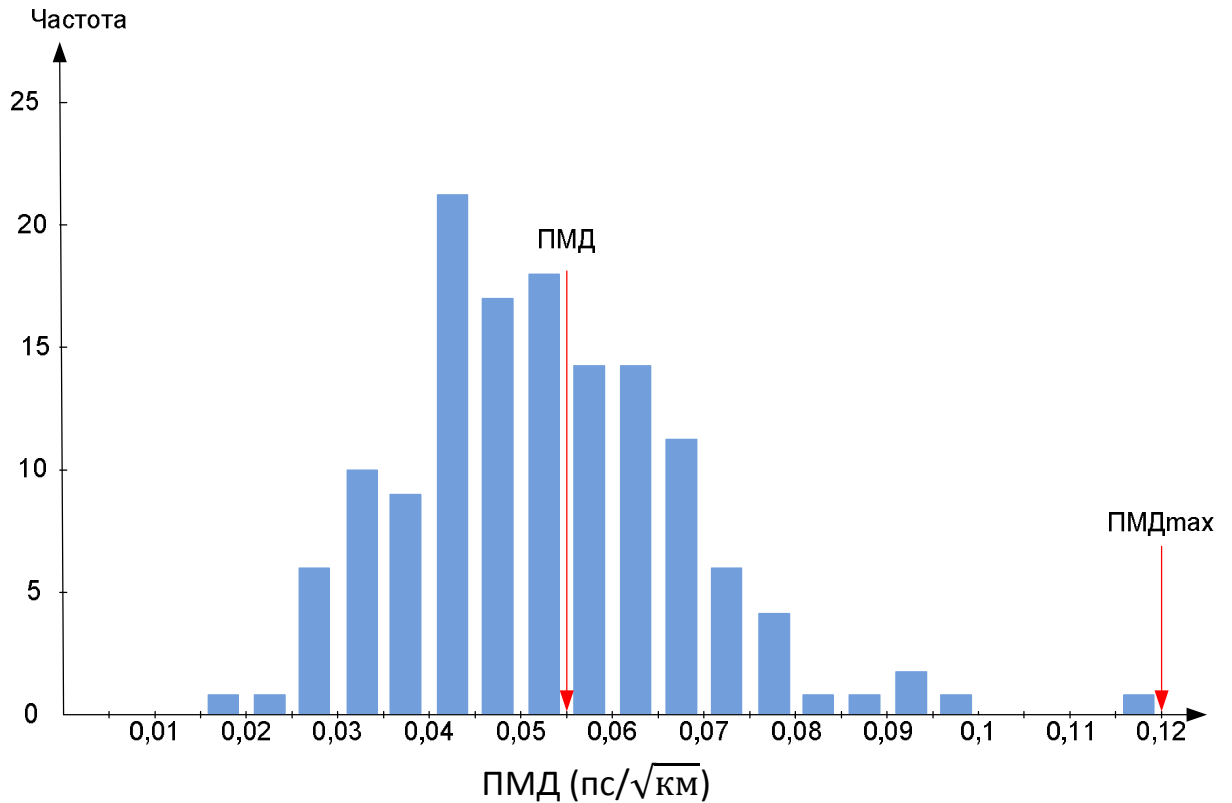
Рис.9 Распределение ДГЗ по Максвеллу





Запас ( $DGZ_{max}/ПМД$ )	Вероятность превышения $DGZ_{max}$
3,0	$4,2 \cdot 10^{-5}$
3,5	$7,7 \cdot 10^{-7}$
4,0	$7,4 \cdot 10^{-9}$

Рис.10 Запас ДГЗ на приемнике



- $\text{ПМД}_{\text{max}}$  дает завышенную оценку ПМД в линии, в то время как среднее ПМД может привести к слишком оптимистичной оценке

Рис.11 Гауссовское распределение ПМД

Понятие  $\text{ПМД}_Q$

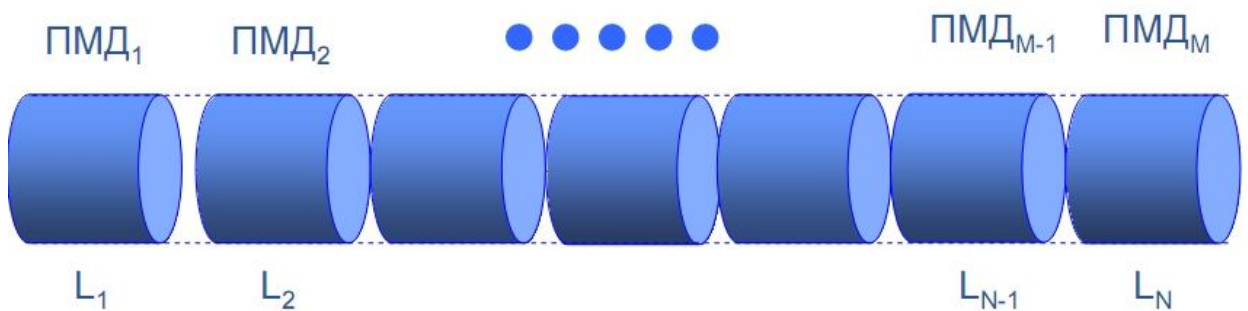


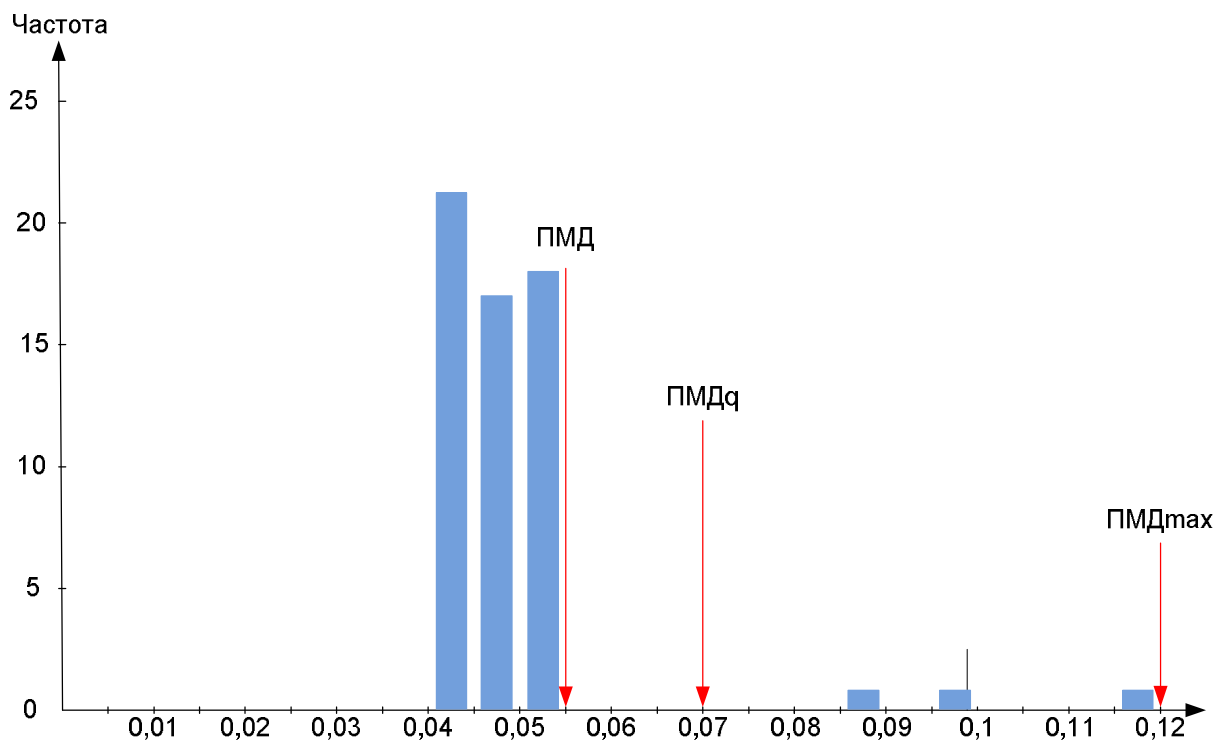
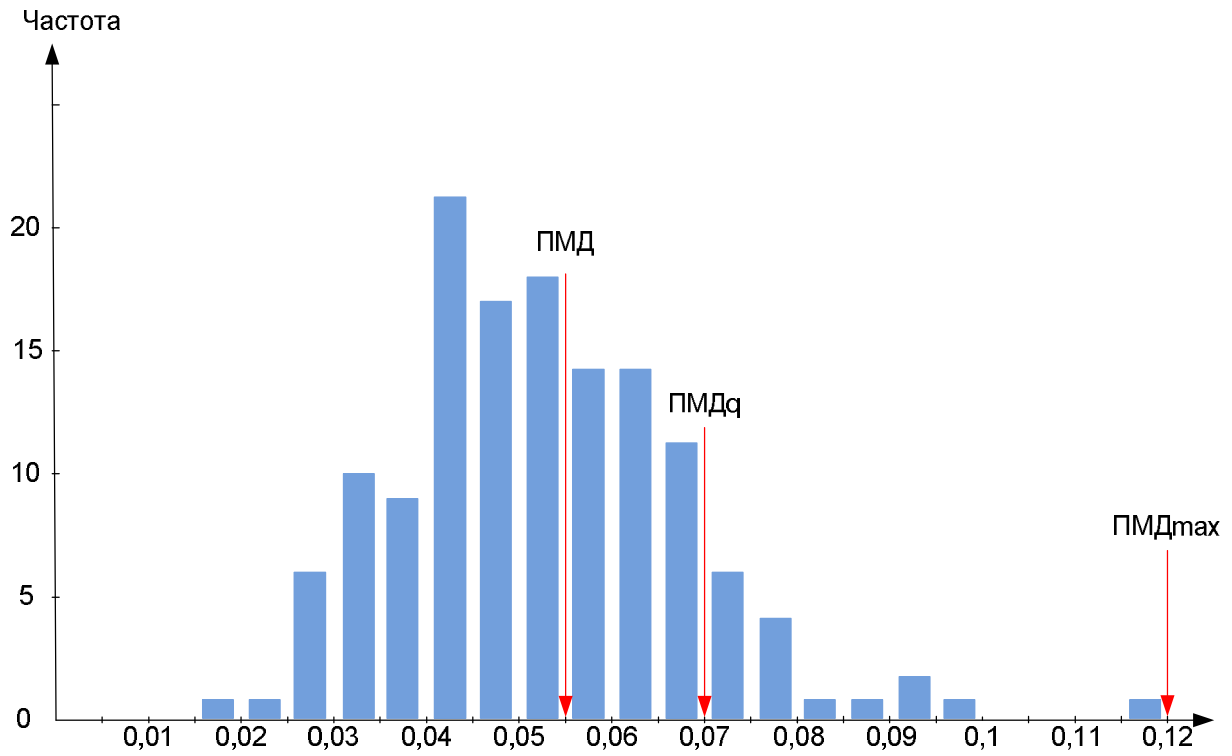
Рис.12  $\text{ПМД}_Q$

$$\text{ПМД}_M = \frac{1}{L_{\text{Link}}} \cdot \sqrt{\text{ПМД}_1^2 \cdot L_1 + \text{ПМД}_2^2 \cdot L_2 + \dots + \text{ПМД}_M^2 \cdot L_M}$$

- $\text{ПМД}_Q$  – это такое значение ПМД участка, состоящего из M одинаковых по длине отрезков волокна, что вероятность того, что  $\text{ПМД}_M$  превзойдет значение  $\text{ПМД}_Q$ , не превышает Q.

**Вероятность  $(\text{ПМД}_M > \text{ПМД}_Q) = Q$**

- В стандартах ITU-T  $M=20$  и  $Q=10^{-4}=0,01\%$ .



- ПМД<sub>Q</sub> является несколько завышенной оценкой коэффициента ПМД линии, которая сварена из 20 строительных длин кабеля
- ПМД<sub>Q</sub> позволяет избежать излишне консервативного проектирования линий дальней связи

Рис.13 ПМД<sub>Q</sub> – практическая оценка при проектировании ВОЛП

**Выводы по первой главе:**

1. Малое значение ПМД оптического волокна и узкополосные источники позволяют организовать передачу на большие расстояния, исключая влияние ПМД2 и значительно облегчая компенсацию ПМД1.
2. Выбирая систему спектрального уплотнения необходимо правильно выбрать расстояние между каналами, чтобы исключить влияние ПМД1 одного канала на соседние.
3. Учитывая влияние ПМД на задержку сигнала и хроматическую дисперсию, были разработаны современные оптические волокна с малым значением ПМД  $< 0,2 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ .
4. Дисперсионная длина, определяемая в [2] и в диссертации Зелюткова Е.А. [91], должны уменьшиться и, следовательно, для компенсации хроматической дисперсии потребуются большие длины компенсирующего волокна, чем при расчетах дисперсионной длины без учета поляризационной модовой дисперсии.
5. Эти утверждения сказываются при больших скоростях передачи от 40 Гбит/с и при больших длинах усилительных участков от 60-100 км.
6. При скоростях передачи 40-100 Гбит/с следует ориентироваться на оптические волокна G-655 по рекомендации Международного союза электросвязи по телекоммуникациям (МСЭ-Т), так как они обладают меньшим значением хроматической дисперсии .
7. Ранние работы по оценке поляризационной модовой дисперсии не дают точного решения и не позволяют оценить её связь с хроматической дисперсией.
8. Согласно полученным результатам ПМД составляет 9-10 % от значения дисперсии групповых скоростей. Эти решения получили подтверждение в работах Агравала [8,11].

9. Полученные ранее решения Фримана [45], Убайдуллаева не дают возможности определиться с допустимыми нормами по ПМД при наличии хроматической дисперсии.

10. Работы Каминова [52, 98] предлагают завышенные нормы по ПМД  $(0,15T_6/\text{ПМД})^2$ , тогда как международная электротехническая комиссия (IEC/TR 61282-3-2002) рекомендует норму, поддержанную МСЭ  $(0,1T_6/\text{ПМД})^2$  (МСЭ G.691).

11. Полученные автором решения поддерживают норму МСЭ. Эта норма поддерживается и решениями Агравала [8, 11].

## Глава 2. Основы распространения сигналов в форме гауссовского импульса по оптическому волокну с учетом ПМД и современных форматов модуляции

### 2.1 Основы распространения сигналов в форме гауссовского импульса по ОВ с учетом формата модуляции

Определив [90] с высокой точностью для гауссовской формы импульсов, их параметры, в частности  $T_0$  (по Агравалу [8], [11]), получим результирующее значение на любой длине ОВ с учетом формата модуляции:

$$\begin{aligned}
 U(z, T) &= \frac{T_0^2 d_M^2}{T_0^2 d_M^2 - i\beta_2 z} \exp \left[ -\frac{T^2 d_M^2}{2(T_0^2 d_M^2 - i\beta_2 z)} \right] \\
 &= \frac{T_6^2 d_M^2}{8 \left[ \frac{T_0^2 d_M^2}{8} - i\beta_2 z \right]} \exp \left[ -\frac{T^2 d_M^2}{2 \left( \frac{T_0^2 d_M^2}{8} - i\beta_2 z \right)} \right] \\
 &= \frac{T_6^2 d_M^2}{[T_6^2 d_M^2 - i8\beta_2 z]} \exp \left[ \frac{T^2 d_M^2}{\left[ \frac{T_6^2 d_M^2 - i8\beta_2 z}{4} \right]} \right] \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Импульсы сохраняют свою форму:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left( \frac{z}{L_d d_M^2} \right)^2} = \frac{2\sqrt{2}T_1}{T_6} = \sqrt{1 + \left( \frac{8\beta_2 z}{T_6^2 d_M^2} \right)^2} = \frac{2,83T_1}{T_6} \quad (2.2)$$

Где:

$$L_d = \frac{T_6^2 d_M^2}{8|\beta_2|} \quad (2.3)$$

Однако, при использовании современных форматов модуляции и учете ПМД:

$$L_{d2} = T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot \frac{(3,33 \cdot \lg M)^2}{8} \cdot \beta_2 \quad (2.4)$$

При учете предварительной коррекции ошибки дисперсионная длина изменится ещё больше:

$$L_{d2} = T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \frac{(Q_1/Q_2)}{8} \cdot \beta_2 \quad (2.5)$$

Согласно решению Агравала показано [8], что уширение гауссовского импульса на входе, не обладавшего частотной модуляцией, не зависит от знака параметра дисперсии групповых скоростей  $\beta_2$ . Импульс уширяется одинаково в области как нормальной, так и аномальной дисперсии в ОБ.

Потери мощности при нормированной амплитуде составят:

$$[U(z, T)]^2 = \left[ \frac{1}{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2}} e^{-\frac{T^2}{2T_0^2 \sqrt[4]{1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2}}} \right]^2 \text{ для формата NRZ} \quad (2.6)$$

Для других форматов модуляции:

$$[U(z, T)]^2 = \left[ \frac{1}{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{z}{L_d \cdot x}\right)^2}} e^{-\frac{T^2}{2T_0^2 \sqrt[4]{1 + \left(\frac{z}{L_d \cdot x}\right)^2}}} \right]^2 \quad (2.7)$$

Где  $L_{dx} = L_{d2}; L_{d3}$

Учитывая гауссовскую форму импульса при допустимом значении  $\frac{T_1}{T_0} = 1,26$ , и  $\frac{z}{L_d} = 0,75$  и потерях на дисперсию в 1 дБ и  $d_M = 1$  получим:

$$[U(z, T)]^2 = 0,192$$

Таблица 2.1. Изменение нормированной амплитуды в зависимости от  $Z/L_d$



$[U(z,T)]^2$	$\frac{z}{L_d}$	$\frac{T}{T_0}$	$[U(z,T)]^2$	$[U(0,T)]$	$[U(0,T)]^2$	% $\frac{[U(0,T)]^2 - [U(z,T)]^2}{[U(0,T)]^2}$
0,575	0,3	0,33	1,044	0,58	0,336	1,8
0,524	0,5	0,275	1,118	0,535	0,286	3,85
0,463	0,7	0,215	1,22	0,4771	0,228	5,7
0,43	0,8	0,186	1,28	0,44	0,194	4,1
0,395	0,9	0,156	1,345	0,406	0,165	5,45
0,363	1,0	0,132	1,414	0,368	0,135	2,2

Нормированная амплитуда  $[U(z,T)]^2$  уменьшается в зависимости от соотношения

$$\frac{z}{L_d} \text{ и } \frac{T}{T_0}$$

Согласно таблице 2.2 получим потерю мощности при соотношениях между  $\frac{z}{L_d}$  и

$$\frac{T}{T_0}$$

Таблица 2.2 Потеря мощности в зависимости от  $Z/L_d$

$\frac{z}{L_d}$	$\frac{T}{T_0}$	$10 \lg \frac{T}{T_0}$ , дБ	$\frac{[U(z,T)]^2}{[U(0,T)]^2}$	$\frac{T}{T_0} = \frac{T \cdot 2\sqrt{2}}{T_0} = \frac{2,83 \cdot T}{T_0}$
0,3	1,044	0,187	0,982	2,95
0,5	1,118	0,484	0,96	3,16
0,7	1,22	0,864	0,94	3,45
0,8	1,28	1,07	0,96	3,62

0,9	1,345	1,29	0,945	3,81
1,0	1,414	1,5	0,978	4,0

## 2.2 Связь между хроматической дисперсией и поляризационной модовой дисперсией (новый подход) и подтверждение полученных решений.

Согласно [52] норма на поляризационную модовую дисперсию для гауссовского импульса определяется из выражения:

$$B^2 \cdot L_{\text{ПМД}} < \left(\frac{0,14}{\text{ПМД}}\right)^2 \quad (2.8)$$

или

$$B^2 \cdot L_{\text{ПМД}} < \left(\frac{0,14 \cdot T_6^2}{\text{ПМД}}\right)^2 = \left(\frac{0,396 \cdot T_0}{\text{ПМД}}\right)^2 = \left(\frac{0,659 \cdot T_{\frac{1}{2}}}{\text{ПМД}}\right)^2 \quad (2.9)$$

где  $L_{\text{ПМД}}$  - допустимая длина  $L$  (км) при которой потери от поляризационной модовой дисперсии не превысят 1 Дб по мощности.

$B$ -скорость передачи по оптическому волокну Гбит/с.

$T_6$ -битовый интервал при данной скорости передачи, нс.

ПМД- поляризационная модовая дисперсия, нс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

Из [8] известно, что допустимая длина по ПМД составляет

$$L \leq \left[\frac{0,1 \cdot T_6}{\text{ПМД}}\right]^2 = \left[\frac{0,283 \cdot T_0}{\text{ПМД}}\right]^2 = \left[\frac{0,47 \cdot T_{\frac{1}{2}}}{\text{ПМД}}\right]^2, \text{ км} \quad (2.10)$$

Так как из [8] известно, что

$$T_{\frac{1}{2}} = 1,665 \cdot T_0 \quad (2.11)$$

$$\text{где } T_0 = \frac{T_6}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

Следовательно

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{1,665 \cdot T_0}{2 \cdot \sqrt{2}} = 0,589 \cdot T_0 \quad (2.12)$$

Где  $T_{\frac{1}{2}}$  -длительность гауссовского импульса на уровне 0,5 максимальной интенсивности.

$T_0$  - полуширина импульса по уровню интенсивности  $1/e$  от максимальной интенсивности.

Необходимо подчеркнуть, что ПМД зависит от формы импульса [1]; т.к. потери связаны со значениями ПМД и зависят от этой формы.

$$\varepsilon(\text{дБ}) = A \cdot \frac{\text{ПМД}^2 \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{T_0^2} \text{ для формата модуляции NRZ} \quad (2.13)$$

где  $0 \leq \gamma \leq 1$

$\gamma = 0,1$  при уширении импульса

A-параметр, зависящий от формы импульса и характеристик приемного фильтра (таблица 2.3):

Таблица 2.3. Значение A для различных форм импульса

Форма импульса	A
Гауссовский	25/70
Прямоугольный	12
Треугольный	24
25% нарастание- падение	15

Для других форматов модуляции:

$$\varepsilon(\text{дб}) = \frac{A \cdot \text{ПМД}^2 \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{T_0^2} \quad (2.14)$$

Следовательно, максимально допустимое значение ПМД не должно превышать:

$$\delta_1 = 0,1 \cdot T_0 = 0,1 \cdot 2\sqrt{2} \cdot T_0 = 0,283 \cdot T_0 = 0,47 \cdot T_{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Согласно МСЭ-Т максимально допустимое значение хроматической дисперсии, при которой потери по мощности для гауссовского импульса не превышают 1 дб:

$$\delta_2 = 0,25 \cdot T_0 = 0,25 \cdot 2\sqrt{2} \cdot T_0 = 0,707 \cdot T_0 = 0,425 \cdot T_{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Известно [11], что:

$$\begin{aligned} \delta^2 &= \delta_1^2 + \delta_2^2 = (0,283 \cdot T_0)^2 + (0,707 \cdot T_0)^2 = 0,08 \cdot T_0^2 + 0,5 \cdot T_0^2 = \\ &= 0,58 \cdot T_0^2 \quad (2.17) \end{aligned}$$

$$\delta_2 = (0,17 \cdot T_{\frac{1}{2}})^2 + (0,425 \cdot T_{\frac{1}{2}})^2 = 0,209 \cdot T_{\frac{1}{2}}^2 \quad (2.18)$$

Также известно [52], что для гауссовского импульса:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2}{T_0^2}} = \sqrt{1 + (0,1 \cdot 2\sqrt{2})^2 + (0,25 \cdot 2\sqrt{2})^2} = \sqrt{1,58} = 1,257 \quad (2.19)$$

Отсюда потери по мощности составляют:

$$10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_0} \leq 1 \text{ дб}$$

Конечно, основной вклад в потери по мощности вносит хроматическая дисперсия, а с поляризационной дисперсией можно не считаться при малых

скоростях передачи, т.к. ограничения по длине будут составлять при равных скоростях большие значения, например для формата модуляции NRZ (таблица 2.4).

Таблица 2.4. Ограничение по длине для ПМД при формате модуляции NRZ.

Скорость передачи	2,5	10	40	100	
$L_{\text{ПМД}}, \text{ км}$	$\frac{6400}{40000}$	$\frac{400}{2500}$	$\frac{25}{156}$	$\frac{4}{25}$	$\frac{\text{ПМД} = 0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}}{\text{ПМД} = 0,2 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}}$
$L_{\text{хд}}, \text{ км}$	$\frac{1111}{3333}$	$\frac{69,4}{208}$	$\frac{4,3}{13}$	$\frac{0,7}{2,1}$	$\frac{\beta_2 = 18 \text{ пс}^2/\sqrt{\text{км}}}{\beta_2 = 6 \text{ пс}^2/\sqrt{\text{км}}}$

Ограничения по хроматической дисперсии определяются из  $L_{\text{хд}}$ :

$$L_{\text{хд}} = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot \beta_2}, \text{ км} \quad (2.20)$$

Эти ограничения зависят и от скорости передачи и формата модуляции  $d_m$  и дисперсии групповых скоростей  $\beta_2$ .

При больших значения  $\beta_2$  и малых скоростях передачи, значения будут довольно большими, а при малых значениях  $\beta_2$  эти значения будут очень большими (таблица 2.5)

Таблица 2.5. Допустимые длины по хроматической дисперсии, км

Скорость передачи	2,5	10	40	100	$d_m=1$
$\beta_2 = 21 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	952	59,5	3,7	0,6	
$\beta_2 = 6 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	3333	208	13	2,1	
$\beta_2 = 3 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	6666	416	26	4,2	

Таким образом, допустимые значения на хроматическую и поляризационную дисперсии:

$$\delta^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 = (2 \cdot \sqrt{2})^2 \cdot [0,0625 + 0,01] \cdot T_0^2 = 8 \cdot 0,0725 \cdot T_0^2 = 0,58 \cdot T_0^2 \quad (2.21)$$

А допустимые уширения с учетом этих двух факторов составит (таблица 2.6):

Таблица 2.6. Допустимые значения по уширению Гауссовского импульса

ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$l_{\text{ПМД}}^{0,1 \cdot T_6}$ , км	$0,32 \cdot T_0^2$	$0,5 \cdot T_0^2$	$0,89 \cdot T_0^2$	$2 \cdot T_0^2$	$8 \cdot T_0^2$
$l_{\text{ПМД}}^{0,14 \cdot T_6}$ , км	$0,627 \cdot T_0^2$	$0,98 \cdot T_0^2$	$1,74 \cdot T_0^2$	$3,92 \cdot T_0^2$	$15,68 \cdot T_0^2$

Для формата модуляции NRZ

$$T_6^2 = 8 \cdot \beta_2 \cdot lg, \text{ отсюда } T_6 = 2,83 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot lg} \quad (2.22)$$

Нам известно, что норма на хроматическую дисперсию составляет  $0,25 \cdot T_6$ , а норма на ПМД  $-0,1 \cdot T_6$ .

$$0,1 \cdot T_6 = 0,1 \cdot 2,83 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot lg} \quad (2.23)$$

Другими словами допустимая норма на ПМД составит на дисперсионную длину:

$$0,283 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot lg} \quad (2.24)$$

а норма на хроматическую дисперсию составит:

$$0,25 \cdot T_6 = 0,7075 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot lg}, \text{ т. е. в 4 раза больше.} \quad (2.25)$$

Учитывая значения нормы ПМД, выраженное через хроматическую дисперсию получим.

$$0,283 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot lg} = \text{ПМД} \cdot \sqrt{lg} \quad (2.26)$$

$$0,08 \cdot \beta_2 \cdot lg = \text{ПМД}^2 \cdot lg \quad (2.27)$$

В этом случае  $\text{ПМД} = \sqrt{0,08 \cdot \beta_2}$ , при принятой норме  $0,1 \cdot T_6$  получим (таблица 2.7):

Так для ОВ при  $\lambda=1,55$  мкм

Таблица 2.7. Значения ПМД для ОВ G-652 и G-655

Волокно	$\beta_2 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	ПМД $\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$ допустимая	ПМД $\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$ реальная
G-652	21	1,3	0,2-0,5
G-655	6	0,69	0,1-0,2

При  $0,283 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l g} = \text{ПМД} \cdot \sqrt{e}$ , при реальных значениях ПМД ОВ (таблица 2.8):

Таблица 2.8. Допустимые значения ПМД для реальных ОВ

Волокно	$\beta_2 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	ПМД $\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$	$L_{\text{ПМД}}$
G-652	21	0,2	$42L_{\text{д}}$
G-655	21	0,5	$6,72L_{\text{д}}$
G-655	21	0,2	$12L_{\text{д}}$
G-655	3	0,2	$6L_{\text{д}}$

Задача при полученных решениях определить не задержку, задержка определена нормой  $0,1 \cdot T_6$ , пс (10% от  $T_6$ ). Отношение сигнал/шум несомненно ухудшится при допустимой норме.

$$Q_0 = \frac{\sqrt{T_6^2 - (0,1 \cdot T_6)^2}}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l + 0,08 \cdot \beta_2 \cdot l}} = \frac{0,995 \cdot T_6}{2 \cdot \sqrt{1,08 \cdot \beta_2 \cdot l}} \quad (2.28)$$

Вместе с тем принимая величину ПМД по характеристике ОВ, мы допускаем ошибку, т.к.

$$\text{ПМД}_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{(\text{ПМД}_{\text{ов}})^2 + n \cdot (\text{ПМД}_{\text{XD}})^2 + n \cdot (\text{ПМД}_{\text{y}})^2}{l_{\text{л}}}} \quad (2.29)$$

Где  $l_{\text{л}} = n \cdot l_{\text{кд}} + l_{\text{линии}}$ .

В усилительной системе источниками поляризационных эффектов являются: широкополосный фильтр, оптический усилитель, приемное устройство, передающее устройство, изолятор, сплиттер.

Согласно [8] дисперсионная длина, связана с хроматической дисперсией в одномодовых оптических волокнах при высоких скоростях передачи и определяется выражением:

$$L_{\text{д}} = \frac{T_0^2}{|\beta|_2}, \text{ км} \quad (2.30)$$

Доказано [52], что дисперсионная длина может быть выражена через битовый интервал  $T_6$  и  $T_{1/2}$ - полную длительность гауссовского импульса по уровню половинной максимальной интенсивности:

$$L_{\text{д}} = \frac{T_6^2}{8 \cdot |\beta|_2} = \frac{T_{1/2}^2}{2,77 \cdot |\beta|_2}, \text{ км} \quad (2.31)$$

Кроме того в данное выражение может быть введен формат модуляции  $d_{\text{м}}$ , для рассматриваемой скорости передачи:

$$L_{\text{д}} = \frac{T_0^2 \cdot d_{\text{м}}^2}{|\beta|_2} = \frac{T_6^2 \cdot d_{\text{м}}^2}{8 \cdot |\beta|_2} = \frac{T_{1/2}^2 \cdot d_{\text{м}}^2}{2,77 \cdot |\beta|_2}, \text{ км} \quad (2.32)$$

Согласно [11] допустимое значение уширения, вызванного хроматической дисперсией, при котором возникают потери в 1 дБ, равно:

$$\delta = \frac{T_6}{4} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot T_0}{4} = 0,707 \cdot T_0 \quad (2.33)$$



Другими словами, уширение импульса при данном допустимом значении будет равно:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,25$$

Новый подход в определении допустимого значения  $l$  заключается в том, что значение  $l < l_D$  и когда:

$$l = \frac{(1 - 0,25) \cdot (T_6)^2 \cdot d_M^3}{8 \cdot |\beta_2|}, \text{ км} \quad (2.34)$$

Это решение является точным при значении:

$$\Delta T = 0,25 \cdot T_6 < T_0 = \frac{T_6}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (2.35)$$

При  $\Delta T > T_0$ ,

$$l = \frac{x \cdot T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot |\beta|_2} \text{ где } x = 1 + \Delta \quad (2.36)$$

Из известного выражения можно определить значение  $l$ , при котором потери за счет уширения импульса из-за хроматической дисперсии будут составлять 2 дБ.

В этом случае  $l/l_g = 1,25$  и  $\frac{T_1}{T_2} = 1,6$ , отсюда:

$$10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_0} = 2 \text{ дБ}$$

При учете поляризационной модовой дисперсии исходим из полученного ранее решения:

$$l_{\text{пмд}} = \left[ \frac{0,1 \cdot T_6}{D_{\text{пмд}}} \right]^2 \quad (2.37)$$

Если приравнять:

$$l_{\text{хд}} = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta|_2} \text{ и } l_{\text{ПМД}} = \left[ \frac{0,1 \cdot T_6}{D_{\text{ПМД}}} \right]^2$$

получим при потерях на дисперсию в 1 дБ

$$l_{\text{хд}} = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta|_2} \text{ и } l_{\text{ПМД}} = \left[ \frac{0,1 \cdot T_6 \cdot d_m^2}{D_{\text{ПМД}}} \right]^2 \quad (2.38)$$

$$D_{\text{ПМД}} = 0,327 \cdot \sqrt{\beta_2} \text{ при } l_{\text{хд}} = l_{\text{ПМД}}$$

При тех же условиях увеличим допустимую задержку по поляризационной модовой дисперсии в три раза при неизменном значении поляризационной модовой дисперсии. В этом случае:

$$D_{\text{ПМД}} = 0,98 \cdot \sqrt{\beta_2} \quad (2.39)$$

При той же норме по задержке  $0,1T_6$   $D_{\text{ПМД}}$  изменяется с учетом всех элементов на линии в 3 раза, длина ПМД уменьшится в 9 раз.

В этом случае:

$$D_{\text{ПМД}} = 0,327 \cdot \sqrt{\beta_2} \quad (2.40)$$

При увеличении задержки по поляризационной модовой дисперсии в три раза получим изменение значения ПМД:

$$D_{\text{ПМД}} = 0,98 \cdot \sqrt{\beta_2} .$$

$$\text{ПМД}^2 \cdot L = \frac{\tau^2 \cdot \pi^2}{64} \quad (2.41)$$

Где  $\tau$  – дифференциальная модовая задержка

$$\text{Отсюда } \sqrt{\text{ПМД}^2 \cdot L} = 0,3925 \cdot \tau$$

Учитывая выражение:

$$D_{\text{пмд}} = 0,327 \cdot \sqrt{\frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot c} \cdot D_{\text{хд}}} = x \cdot \sqrt{D_{\text{хд}}}$$

Таблица 2.9. Зависимость  $D_{\text{пмд}}$  от длины волны.

$\lambda$ , нм	1260	1360	1460	1530	1550	1565	1625	1675
$\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2}$	1,187	1,02	0,884	0,805	0,784	0,77	0,713	0,67
$\sqrt{\frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot c}}$	0,918	0,99	1,06	1,11	1,13	1,14	1,18	1,22
$x_1$	0,3	0,324	0,347	0,363	0,37	0,373	0,386	0,399

Согласно таблице 2.9.  $x$  изменяется в диапазоне длин волн 1260-1675, от 0,3 до 0,4. Поэтому:

$$D_{\text{пмд}} = (0,3 - 0,4) \cdot \sqrt{D_{\text{хд}}} \quad (2.42)$$

Для того, чтобы учесть воздействие хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии, необходимо ориентироваться на норму хроматической дисперсии  $0,25T_6$  и поляризационной модовой дисперсии  $0,1T_6$ .

Суммарное значение  $\Delta T$  будет равно:

$$\Delta T = \sqrt{(0,25 \cdot T_6)^2 + (0,1 \cdot T_6)^2} = 0,269 \cdot T_6$$

В результате:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,269 \text{ т. е. } 10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_0} = 1 \text{ дБ}$$

Отсюда получим при неизменной дисперсионной длине:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{l}{l_d}\right)^2} = 1,269 \text{ получим } \frac{l}{l_d} = 0,78$$

Исходя, из полученных решений изменится дисперсионная длина с учетом поляризационной модовой дисперсии  $l_d^{\text{хд+пмд}}$  и допустимая длина  $l^{\text{хд+пмд}}$ :

$$l_{\text{д}}^{\text{хд+пмд}} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot (\beta_2 + 0,106 \cdot \beta_2)} \quad (2.43)$$

$$l_{\text{д}}^{\text{хд+пмд}} = \frac{(1 - 0,296) \cdot T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot (\beta_2 + 0,106 \cdot \beta_2)} \quad (2.44)$$

Как можно видеть из полученных, решений дисперсионная длина, с учетом  $l_{\text{д}}^{\text{хд+пмд}} < l^{\text{хд+пмд}}$ . ПМД уменьшится и уменьшится допустимая длина.

Приведем конкретный пример для оптического волокна G-652С и G-655 по рекомендации МСЭ-Т для скоростей передачи 40-100 Гбит/с. Для длины волны 1550 нм  $D_{\text{хд}} = 17 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$  для ОВ G-652 и  $6 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$  для ОВ G-655. В этом случае  $\beta_2 = 21,7 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$  для ОВ G-652 и  $\beta_2 = 7,65 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$  для ОВ G-655.

Результаты расчета  $l_{\text{д}}$  и  $l$  для хроматической дисперсии и хроматической с учетом поляризационной дисперсии приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10. Результаты расчета  $l^{\text{хд}}$ ,  $l^{\text{хд+пмд}}$ ,  $l_{\text{д}}^{\text{хд+пмд}}$ ,  $l_{\text{д}}^{\text{хд}}$

ОВ	G-652		G-655	
	40 Гбит/с	100 Гбит/с	40 Гбит/с	100 Гбит/с
$\beta_2 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$	21,7	21,7	7,65	7,65
$l_{\text{д}}^{\text{хд}} d_M = 1, \text{ км}$	3,6	0,576	10,2	1,63
$l_{\text{д}}^{\text{хд+пмд}} d_M = 1, \text{ км}$	3,26	0,52	9,2	1,47
$l^{\text{хд}}, \text{ км}$	2,7	0,432	7,65	1,22
$l^{\text{хд+пмд}}, \text{ км}$	2,54	0,406	6,92	1,15

Для того, чтобы сохранить потери по дисперсиям в 1 дБ, необходимо уменьшить расстояние между усилителями и, тем самым увеличить значение  $ПМД_{\text{среднее}}$  за счет дополнительных усилителей и компенсаторов хроматической дисперсии. Однако, если не уменьшать допустимую длину и оставить решения по длине на уровне хроматической дисперсии, то мы получим увеличение потерь по затуханию за счет поляризационной модовой дисперсии (ПМД) и большее значение уширения импульса.

Более важно рассмотреть это решение для ОВ G-655 и для скорости передачи 40 Гбит/с:

$$l_d^{хд} = 10,2 \text{ км } d_M = 1$$

$$l^{хд+пмд} = \frac{x \cdot T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot (1,106 \cdot |\beta_2|)} = 10,2 \text{ км } x = 1,1$$

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,1$$

$$l^{хд+пмд} = l^{хд} = 7,65 \text{ км}$$

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,25 \cdot 1,1 = 1,375$$

В результате потери по дисперсии будут составлять 1,38 дБ. Необходимо в этом случае также учесть в дальнейшем современные форматы модуляции, методы предварительной коррекции ошибок и методику расчета компенсации дисперсии через дисперсионную длину.

Можно определить исходя из принятых норм при какой скорости передачи

$$l_{хд} = \frac{l_{пмд}}{T_6} = 138 \text{ пс} - B = 7,2 \text{ Гбит/с}$$

В усилительной системе источниками поляризационных эффектов, являются: широкополосный фильтр, оптический усилитель, приемное устройство, передающее устройство, изолятор, сплиттер.

Явление поляризационной модовой дисперсии создается, как известно, двулучепреломлением, которое кроме внутренних причин (изменение диаметра ОВ, анизотропия за счет примесей и др.) может быть результатом внутренних и внешних воздействий на ОВ. Процесс производства ОКС и строительства связан с уже созданным ОВ и поэтому определяется внешними механическими и температурными воздействиями. При производстве ОКС 4 главных этапа следует выделить: расцветка ОВ, протяжка в модули, армирование сердечника ОКС и наложение оболочки.

### **2.3 Ускоренное решение по определению вероятности ошибки в волоконно-оптической линии передачи.**

В техническом паспорте аппаратуры обычно указываются следующие параметры:

1. Скорость передачи оптического сигнала  $V$ , Мбит/с.
2. Длина волны источника излучения  $\lambda$ , мкм.
3. Тип источника излучения.
4. Ширина спектра источника излучения  $\Delta\lambda$ , мкм.
5. Уровень излучаемой мощности  $P_{\text{пер}}$ , дБм.
6. Минимальный уровень приема  $P_{\text{пр.мин.}}$ , дБм.
7. Максимальный уровень приема  $P_{\text{пр.макс.}}$ , дБм.
8. Дополнительные потери оптического тракта  $\Delta A$ , дБ.

Кроме указанных характеристик необходимо знать требования к ОВ:

1. Дисперсионную длину  $L_d$ , км,

2. Нелинейную длину  $L_{\text{нл}}$ , км,
3. Эффективную длину  $L_{\text{эфф}}$ , км,
4. Длину по поляризационной модовой дисперсии  $L_{\text{пмд}}$ , км,
5. Длину по затуханию  $L_a$ , км,
6. Отношение сигнал/шум в оптическом канале,
7. Отношение сигнал/шум в электрическом канале .

При определении [91] отношения сигнал/шум в электрическом канале необходимо знать:

1. Допуски на хроматическую дисперсию при потерях на эту дисперсию 1- 2 дБ,
2. Наличие нелинейных эффектов,
3. Длина участка по затуханию (усилительного, регенерационного),
4. Формат модуляции,
5. Выбор расстояния между каналами в зависимости от скорости передачи и системы передачи при ВОСП-СП.

Дополнительные потери оптического тракта учитывают деградацию источника излучения, а минимальный уровень приема гарантирует величину коэффициента ошибок регенератора.

Максимальный уровень приема ограничивает перегрузку фотоприемника. Разность уровня передачи и минимального уровня приема называют энергетическим потенциалом системы

Минимальный уровень приема для р-і-п фотодиодов для скорости передачи  $V > 50$  Мбит/с будет равен:

$$-55 + 10 \lg V, \text{дБм}$$

Для лавинных фотодиодов при тех же условиях:

$$-70 + 10 \lg B, \text{ дБм}$$

Максимальное значение затухания регенерационного участка равно:

$$A_{\text{макс}} = 2 \cdot A_p + \pi \cdot A_{\text{нр}} + \alpha \cdot l_{\text{ргу}} + A_t + A_v, \text{ дБ} \quad (2.45)$$

Здесь:  $l_{\text{ргу}}$  - длина регенерационного участка, км,  $A_p$  - затухание разъемного оптического соединителя, равное 0,3-1,5 дБ,  $A_{\text{нр}}$  - затухание неразъемного оптического соединителя, равное 0,05-0,1 дБ.  $\alpha$ -коэффициент затухания оптического волокна, дБ/км,  $A_t$ -допуски на температурные изменения параметров ВОЛП, равные 0,5-1,5 дБ,  $A_v$ - допуски на ухудшение параметров ВОЛП со временем ( $A_v = 2-6$  дБ). Число неразъемных соединений равно:

$$\pi = \frac{l_{\text{ргу макс.}}}{l_{\text{стр}} - 1} \quad (2.46)$$

В результате получим максимальную длину регенерационного участка по затуханию:

$$l_{\text{ргу макс.}} = \mathcal{E} + A_n + 2 \cdot A_p - \frac{\mathcal{E}_z}{\left(\alpha + \frac{A_p}{l_{\text{стр}}}\right)}, \text{ км} \quad (2.47)$$

Здесь  $\mathcal{E}_z = A_t + A_v$  - энергетический эксплуатационный запас.

При автоматической регулировке усиления приемных устройств длина участка регенерации уменьшается за счет потерь на АРУ-  $A_{\text{ару}}$ :

$$l_{\text{ргу мин.}} = \mathcal{E} + A_{\text{нр}} + 2 \cdot A_p - \frac{\mathcal{E}_z - A_{\text{ару}}}{\left(\alpha + \frac{A_{\text{нр}}}{l_{\text{стр}}}\right)}, \text{ км} \quad (2.48)$$

Для различных форматов модуляции, известно время нарастания по которому определяется функциональная способность системы в целом:

Для формата NRZ:



$$0,7 \cdot T_6 > 1,1 \cdot \sqrt{T_{\text{пер}}^2 + (D_1 \cdot \Delta\lambda)^2 + T_{\text{пр}}^2} \quad (2.49)$$

А для формата RZ:

$$0,35 \cdot T_6 > 1,1 \cdot \sqrt{T_{\text{пер}}^2 + (D_1 \cdot \Delta\lambda)^2 + T_{\text{пр}}^2} \quad (2.50)$$

Следует отметить, что  $0,7T_6 = 2T_0$  для гауссовского импульса, а  $0,35T_6 = T_0$ , а  $T_0 = T_{\text{ос}}/1,665$

Кроме того, для формата модуляции RZ необходимо учитывать параметр модуляции  $d_m$ :

0,5; 0,33; 0,67.

Зная характеристики аппаратуры передачи ( $T_{\text{пер}}$  и  $T_{\text{пр}}$ ) и формат модуляции можно определить какое время нарастания допускается для оптического волокна, которое применяется с данной аппаратурой и какую длину регенерационного участка необходимо выбрать.

До скорости передачи 5 Гбит/с определяющей характеристикой при выборе длины регенерационного участка является затухание (2). При скорости передачи 10 Гбит/с и выше определяющим параметром уже является хроматическая дисперсия и поляризационная дисперсия. Введенное понятие дисперсионной длины и параметра дисперсии групповых скоростей  $\beta_{22}$  позволяет сразу определить Q-фактор, который устанавливает связь между дисперсионной длиной, допустимыми нормами и вероятностью ошибки.

Связь между параметром D и  $\beta_2$  определено выражением:

$$D = -2 \cdot \pi \cdot c \cdot \frac{\beta_2}{\lambda^2} \quad (2.51)$$

В этом случае Q-фактор в оптическом канале определяется выражением:

$$2 \cdot Q_0 = \frac{T_6}{\sqrt{\beta_2 \cdot l + (D_{\text{ПМД}} \cdot \sqrt{l})^2}} \quad (2.52)$$

При этом, следует учитывать, что мощность в оптическом канале  $P_0^2$  равна мощности в электрическом канале  $P_3$ .

$$Q_0 = \sqrt{0\text{СШ}} = 4 \cdot \sqrt{Q_3} \quad (2.53)$$

Полученные решения позволяют через параметр «отношение сигнал / шум» в оптическом канале определить вероятность ошибки, которая решается через параметр  $Q$  с учетом влияния хроматической и поляризационной дисперсии.

Согласно [1] известно, что усиление импульсов гауссовской формы в оптическом волокне определяется выражением:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{T_2}{T_{1/2}} = \frac{T_3}{T_6} = \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{L_d}\right)^2} \quad (2.54)$$

$T_6$ - битовый период рассматриваемого сигнала, пс;

$T_0$ - длительность импульса на уровне 0,1 интенсивности, пс;

$T_{1/2}$ - длительность импульса на уровне 0,5 интенсивности, пс;

$T_1; T_2; T_3$ - соответствующее длительности импульсов на рассматриваемых уровнях на приеме элементарного кабельного участка, (ЭКУ), пс;

$Z$ - длина ЭКУ, по дисперсии, км;

$L_d$ - дисперсионная длина, км;

$L_d$ - определяется(2.32):

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot \beta_2}, \text{ км}$$

где  $d_m$ - формат модуляции

$$NRZd_m = 1, RZ05d_m = 0,5, RZ0,67d_m = 0,67, RZ033d_m = 0,33$$

$\beta_2$ -дисперсия групповых скоростей

Согласно [8] можно записать:

$$\frac{T_3}{T_6} = \sqrt{1 + \left(\frac{1,85}{Q_0^2}\right)^2} \quad (2.55)$$

Где  $Q_0$ - Q фактор в оптическом канале, отсюда:

$$\frac{Z}{L_d} = \frac{1,85}{Q_0^2} \quad (2.56)$$

Определив требования по Q-фактору на входе в приемник ( $P_0^2 = P_3$  и  $Q_3 = \sqrt{P_3}$ ), какой должен быть Q-фактор электрическом канале  $Q_3=Q_0^4$  найдем необходимую длину  $Z=L$ , зная характеристики для оптического волокна и систем передачи:

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot Z}} \quad (2.57)$$

Проверив полученный результат на вышеприведенном выражении, следует отметить, что в данном решении не учитывается поляризационная модовая дисперсия, которая может изменить, как параметры  $L_g$ ;  $Z$ ;  $Q_0$ ;  $Q_3$ . Зависимость вероятности ошибки от  $Q_3$  представлена в таблице 2.11

Таблица 2.11 Зависимость  $Q_3$  от вероятности ошибки

$Q_3$	1,0	2	3,5	4,5	5,2	5,5	5,8	5,9	6,1	6,5	6,8	7,0	7,4	7,7
Вер	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$
8														
$10^{-15}$														

Для ЭКУ данная задача не представляет большой сложности, т.к. рассматривается только дисперсия оптического волокна (ОВ) от передатчика до приемника.

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l_1 + \text{ПМД}^2 \cdot l_1}} \quad (2.58)$$

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot (\beta_2 + \text{ПМД}^2)} \quad (2.59)$$

и  $Q_0$  требуемое уменьшится.

Известно, чем больше Q фактор, тем меньше вероятность ошибки. Однако, при малых скоростях передачи до 10 Гбит/с включительно, для стандартных ОВ можно не считаться с ПМД.

Вместе с тем при рассмотрении линии большой протяженности при  $L_{\text{ргу}} \gg L_{\text{эку}}$ , например, при 5-8 усилительных участках значение поляризационно-модовой дисперсии изменяется и будет равно:

$$\text{ПМД}_1 = \frac{\sqrt{(\text{ПМД} \cdot L_{\text{ргу}})^2 + N \cdot (\text{ПМД}_y)^2}}{L_{\text{ргу}}} \quad (2.60)$$

где  $L_{\text{ргу}}$  - длина регенерационного участка, км, а при наличии компенсаторов дисперсии:

$$\text{ПМД}_2 = \frac{\sqrt{(\text{ПМД} \cdot L_{\text{ргу}})^2 + N_y \cdot (\text{ПМД}_y)^2 + N_k \cdot \text{ПМД}_k^2 \cdot l_k}}{L_{\text{ргу}}} \quad (2.61)$$

где  $N_y$  - число усилительных пунктов,  $N_k$  - число компенсаторов,  $\text{ПМД}_y$  - ПМД усилителя  $\text{ПМД}_k$  - ПМД компенсатора дисперсии.

В этом случае:

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot (\beta_2 + \text{ПМД}_2^2)} \quad (2.62)$$

Q-фактор также изменяется:

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot Z_2 + \text{ПМД}_2^2 \cdot Z_2}} \quad (2.63)$$

Для увеличения длины ЭКУ можно воспользоваться упреждающей коррекцией ошибки передатчик-приемник (FEC), при которой происходит кодирование усиления на передаче и декодирование на приеме с определенной степенью избыточности передаваемого сигнала.

Скорость сигнала увеличивается на 6,3%. При этом значение Q-фактора уменьшается при допуске на его величину  $Q_3=8$  и вероятность ошибки  $10^{-15}$  или 7 при вероятности  $10^{-12}$ . При первом поколении FEC степень избыточности составляла - 6,3% при коде Рида-Соломона (255,239) при этом при вероятности ошибки  $10^{-12}$   $Q_3=3,5$ ,  $Q_0=1,37$ , т.е. возможность уменьшения  $Q_3$  в 2 раза за счет возможности декодирования сигналов с помощью кодов Рида-Соломона.

При использовании 2-ого поколения FEC с последовательными кодами Рида-Соломона возможно увеличить степень избыточности до 10% и увеличить вероятность ошибки до  $4 \cdot 10^{-3}$  при  $Q_3=2,6$ , а  $Q_0=1,27$ . При использовании турбо-кодов избыточность составляет ~20%, и  $Q_3=2$ , а  $Q_0=1,49$ .

В каждом конкретном случае скорость увеличивается на величину избыточности. Определим какие длины ЭКУ по дисперсии можно в этом случае получить для скорости передачи 10 Гбит/с для стандартного ОВ G-652 D без учета ПМД. При первом поколении и избыточности 6,3%:

$$l_1=55,3 \text{ км}$$

При втором поколении и избыточности 10%:

$$l_2=60,2 \text{ км}$$

При третьем поколении и избыточности 20%:

$$l_3 = 57,6 \text{ км}$$

При отсутствии FEC получим:

$$l = 44,4 \text{ км}$$

Используя 1-е поколение FEC, получим увеличение длины по хроматической дисперсии на 11 км. Вместе с тем длина ЭКУ по усилению увеличится на 6 дБ. Рассмотрим в качестве примера однопролетную линию без промежуточного усиления с мультиплексором и демультимплексором.

Бюджет линии по усилению будет составлять:

$$P = P_{\text{вых}} - P_{\text{пр}} - P_{\text{м}} - P_{\text{дм}} \quad (2.64)$$

где  $P_{\text{вых}}$  – выходная мощность, дБм;

$P_{\text{пр}}$  - мощность на приеме, дБм;

$P_{\text{м}}$  – потери на мультиплексоре, дБ;

$P_{\text{дм}}$  – потери на демультимплексоре, дБ;

При скорости передачи 10 Гбит/с  $P_{\text{вых}} = 0$  дБм,  $P_{\text{пр}} = -24$  дБм,  $P_{\text{м}}$  составляет 5 дБ. Потери  $P_{\text{дм}}$  составляют 4,5 дБ. Другими словами бюджет линии будет составлять 14,5 дБ с учетом разъемных соединений.  $2P_{\text{раз}} = 2$  дБ, получим в линии 12,5 дБ.

Примем затухание стандартного ОВ G-652 с учетом неразъемных соединений  $\alpha = 0,275$  дБ/км. В результате длина ЭКУ будет равна 45,45 км – т.е. это длина по затуханию, а по дисперсии она составила 44,4 км. В данном случае компенсация на 1 км длины возможна за счет предусиления на приеме. Необходимо увеличить эту длину.

За счет FEC первого поколения получаем длину по компенсации дисперсии равную 55,3 км, а за счет кодирования усиления, длина увеличится на 6 дБ, т.е. на 21,8 км, т.е. длина одного пролета увеличивается и становится равной 67,3 км без дополнительного усилителя мощности на передаче и предусилителя на приеме.

Учитывая, что

$$\frac{T_3}{T_6} = \sqrt{1 + (1,85/Q_0^2)^2}$$

Уширение импульса будет равно без упреждающей коррекции ошибки:

$$\frac{T_3}{T_6} = 1,25 \text{ и } Q_0 = 1,63$$

При применении упреждающей коррекции ошибки первого поколения допускается вероятность ошибки  $10^{-3}$ . Это соответствует  $Q_3 = 3,5$  и  $Q_0 = 1,368$ . В этом случае получим:

$$\frac{T_3}{T_6} = 1,46$$

При упреждающей коррекции ошибки допускается уширение импульса 46% от битового интервала при кодировании с помощью кодов Рида-Соломона по первому поколению упреждающей коррекции ошибки.

При включении оптических усилителей в однопролетную схему на передаче и приеме получим увеличение оптической мощности. Так как оптические усилители являются активными элементами, то они являются источниками помехи. Помеха является главной причиной деградации оптического сигнала в оптической линии. Поэтому следует ограничить отношение сигнал/шум:

$$OSNR = \frac{P_{\text{вх.у.}}}{\frac{P_{\text{вх.у.}}}{OSNR} + K - NF} \quad (2.65)$$

$K$  – постоянная равная -58 дБм;

NF – шум усилителя max 6 дБ;

$$OSNR = 58 + P_{\text{вх}} - NF \quad (2.66)$$

При расчете OSNR с учетом только предусилителя с NF=6 дБ, при выходной мощности  $P_{\text{вых}}=0$  дБм, при наличии FEC и при скорости 10 Гбит/с получим OSNR=18 дБ и бюджет мощности 34 дБ, что соответствует в идеале длине равной 123,6 км. При OSNR=18 дБ  $Q_3=8,а Q_0=1,68$ , учитывая скорость передачи 10 Гбит/с и избыточность, требуется компенсация дисперсии на длине  $123,6-55,3=68,3$  км. Однако, при многопролетной схеме следует выбирать длины не больше 80-100 км, в зависимости от длины линии.

При ЭКУ, равном 80 км, требуется компенсация дисперсии - 24,7 км, что может быть реализовано с помощью усилителя типа 2R без дополнительного усилителя мощности на передаче и предусилителя на входе.

Полученные результаты показывают одну из возможностей увеличения расстояния ЭКУ и РГУ за счет упреждающего кодирования усиления без применения новых методов модуляции, что позволяет получить требуемую длину ВОСП без деградации сигнала. При этом использовался формат модуляции NRZ.

### **Выводы по второй главе:**

1. При распространении сигнала по ОВ следует учитывать решения по новым дисперсионным длинам  $L_{d2}$  и  $L_{d3}$ , что позволяет подтвердить решения по неизменности соотношений по уширению гауссовского импульса.
2. При изменении дисперсионной длины пропорционально изменяется и допустимая длина при различных форматах модуляции и соотношение  $L/L_d$  не изменяется.
3. Ускоренное решение по определению вероятности ошибки не учитывает предварительную коррекцию ошибки в полном объеме, но позволяет оценить выбранную длину по хроматической и поляризационной модовой дисперсиям.



4. Учет предварительной коррекции ошибки позволяет увеличить допустимую длину по ХД и ПМД с выбранными форматами модуляции.
5. При учете предварительной коррекции ошибки (при отрицательном кодировании усиления) получаем различные значения, как дисперсионной длины, так и допустимой длины.
6. ПМД также вносит свой вклад в изменение дисперсионной длины, уменьшая её.

### Глава 3. Методика расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии.

#### 3.1. Упреждающая коррекция ошибки при скоростях передачи 10-100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ и CRZ.

Известно [5], что при упреждающей коррекции ошибки широко используются коды Рида-Соломона и турбокоды. Также известно, что при увеличении скорости передачи с 10 Гбит/с до 40 Гбит/с мы уменьшаем дисперсионную длину в 16 раз и, следовательно, для одного и того же оптического волокна увеличиваем необходимость компенсации дисперсии на длине элементарного кабельного участка в 16 раз большей по сравнению с длиной при скорости передачи 10 Гбит/с. Вместе с тем при увеличении скорости передачи в 4 раза средняя оптическая мощность уменьшается в 2 раза, т.е. на 6 дБ. Кроме того, если ориентироваться на допустимое значение по уширению гауссовского импульса  $0,25T_6$ , то необходимо принять длину ЭКУ по дисперсии  $0,75l_d$  длины при потерях на дисперсию 1дБ при значении  $Q_э$  фактора 7,1.

Таблица 3.1. Предельно допустимых расстояний оптической линии в зависимости от объема передаваемой информации и типа используемого волокна.

Объем передаваемой информации, Гбит/с	Максимальное время задержки (1550 nm), ps	Расстояние, км	
		Волокно G.652	Волокно G.655
2,5 (STM16)	123	640	4400
10 (STM64)	30	50-100	300-500
40 (STM256)	7,8	5	20-30

На современном этапе имеется возможность избежать влияния хроматической дисперсии (особенно при использовании волокон G.652) установкой на конце линии компенсаторов, имеющих отрицательную дисперсию. Такие компенсационные катушки изготавливаются на дискретные расстояния – 40 км, 60 км, 80 км и т.п.

Определим для стандартного оптического волокна G-652 и оптического волокна G-655 допустимые длины по дисперсии при скоростях передачи 10, 40, 100 Гбит/с и при величинах групповых скоростей для ОВ G-652 - 22,4 пс<sup>2</sup>/км ( $D=18$  пс/нм·км), а для ОВ G-655 - 5 пс<sup>2</sup>/км ( $D=4$  пс/нм·км) на длине волны 1550 нм без учета поляризационной модовой дисперсии. Результаты расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Допустимые длины по хроматической дисперсии для различных скоростей передачи и форматов модуляции

Тип ОВ	10 Гбит/с	10 Гбит/с	40 Гбит/с	40 Гбит/с	100 Гбит/с	100 Гбит/с
	NRZ	RZ05	NRZ	RZ05	NRZ	RZ05
	Lд, км/0,75Lд, км	Lд, км/0,75Lд, км	Lд, км/Lд, км	Lд, км/Lд, км	Lд, км/Lд, км	Lд, км/Lд, км
G-652	55,8/41,9	14/10,5	3,5/2,6	0,9/0,65	0,56/0,42	0,14/0,1
G-655	250/187,5	62,5/46,9	15,6/11,7	3,9/2,9	2,5/1,9	0,625/0,47

Существует 3 поколения предварительной коррекции ошибки (таблица 3.3):

Таблица 3.3. Виды кодов

Поколение ПКО	Коды	Степень кодирования	Qэ, дБ	BER	BER на приеме
Первое	Рид-Соломон	0,93	11,2	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-13}$
Второе	Последовательные Рид-Соломон	0,93-0,79	8,0	$5 \cdot 10^{-3}$	- «-

Третье	Турбо коды	Меньше 0,8	6,3	$2,3 \cdot 10^{-2}$	- « -
Предел	Шенона	0,8	5,4	$2,0 \cdot 10^{-2}$	

Таблица 3.4. Пороги УКО

		Порог ПКО			
Избыточность %	Тип ПКО	Qэ,дБ/Qэ,раз	BER	Qораз	Qо,дБ
7,0 (G-975 МСЭ)	Рид- Соломон, одиночный	11,2/3,65	$1,5 \cdot 10^{-4}$	1,38	2,8
10-25 (G- 975.1)	Рид- Соломон, кратный	8,0/2,52	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1,26	2,0
20-25	Турбо - код	6,3/2,06	$2,3 \cdot 10^{-2}$	1,198	1,57
Предел Шенона		5,4/1,86	$2,0 \cdot 10^{-2}$	1,168	1,35

Формат модуляции может быть выбран NRZ DPSK , решение которого определяется выражением  $3,33 \lg M$  , где M соответствует K бит на символ. Так например, M=4 – 2 бита на символ, M=8 – 4 бита на символ; т.е. M = 2,3,4,8,16. Чем больше M, тем сложнее решение. Для скорости 40 Гбит/с достаточно остановиться на значении M=4. DQPSK схема использует 14,3% избыточности кода на символьном коде 22,9 ГГц. Следующий шаг является предварительная коррекция ошибки при данном формате модуляции.

Для того чтобы решить задачу по увеличению длины усилительного участка для первичного решения дисперсионной длины определим:

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M}{2 \cdot \sqrt{\beta_2} \cdot L_\alpha} \quad (3.1)$$

без учета поляризационной модовой дисперсии.

При применении кодов 1-ого, 2-ого и 3-его поколения:

$$Q_{0x} = \frac{T_6 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M}{2 \cdot \sqrt{\beta_2} \cdot L_\alpha} \quad (3.2)$$

В результате  $Q_{0x}/Q_0 > 1$

На основании этих решений определим новое значение дисперсионной длины:

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot (d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q_{0x}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (3.3)$$

Допустимая длина при потерях на дисперсию не более 1 дБ будет определяться выражением:

$$L = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot (d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q_{0x}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (3.4)$$

Решения, предлагаемые по новой разработанной методике, основаны на работах [86].

Исходными данными являются следующие основные параметры:

- дисперсионная длина по хроматической дисперсии;
- дисперсионная длина по хроматической и поляризационной модовой дисперсии;
- допустимая длина по дисперсии с учетом допустимых значений по потерям на дисперсию;
- требуемая длина для данной системы по затуханию;
- $Q_0$  фактор оптического канала.

- выбор оптического волокна для систем передачи 40-100 Гбит/с
- выбор современных форматов модуляции
- ориентации на нормы хроматической и поляризационной модовой дисперсий
- использование предварительной коррекции ошибки.
- разница в длинах по затуханию и по дисперсиям компенсируется с помощью волокон по компенсации дисперсии и других компенсационных схем.

Во всех рассмотренных расчетах Qэ-фактор будет равен 7,1, что соответствует вероятности ошибки  $10^{-12}$ . При средней постоянной оптической мощности сигнала оптический импульс при формате модуляции RZ05 будет иметь удвоенную пиковую мощность по сравнению с форматом модуляции NRZ. Увеличение мощности возникает вследствие того, что оптические усилители входят в режим насыщения; в результате усиление будет соизмеримо со средней входной мощностью, а фототок фотодетектора пропорционален оптической мощности. Поэтому принимаемая электрическая мощность пропорциональна квадрату оптической мощности.

Так, если принять среднюю оптическую мощность формата модуляции NRZ равной  $P$  при передаче «1», то при передаче «1» RZ05 мощность будет  $2P$ , то есть на 3 дБ больше (в 2 раза). Вместе с тем происходит повышение электрической энергии на бит и дробовый шум приемника также увеличивается для импульса с большой амплитудой. Это уменьшает эффект преимущества до 2,5 дБ (1,78 раз). Другими словами, если при использовании формата модуляции RZ05 уменьшаем расстояние между усилителями за счет хроматической дисперсии в 4 раза по сравнению с форматом модуляции NRZ, то по мощности мы увеличиваем это расстояние в 1,78 раз. Если принять затухание оптического волокна с учетом неразъемных соединений, равным 0,275 дБ/км, то увеличение длины будет равно 9 км для формата модуляции RZ50% по сравнению с форматом модуляции NRZ. Ясно, что данные рассуждения могут быть

применимы при скоростях передачи 10-100 Гбит/с. Как увеличить расстояние между усилителями без компенсирующих элементов на линии:

-замена оптического волокна G-652 на ОВ G-655 и при скорости передачи 10 Гбит/с, принять расстояние между усилителями при формате модуляции NRZ равным дисперсионной длине. Однако, при переходе на скорость передачи 40 Гбит/с при тех же равных условиях следует применить упреждающую коррекцию ошибки. Из таблицы 3.2 видно, что длина усилительного участка по хроматической дисперсии для ОВ G-655 для скорости передачи 40 Гбит/с для формата модуляции NRZ больше в 4 раза, чем для формата модуляции RZ05 и равно всего 13 км. Используем 1-е поколение упреждающей коррекции ошибки: код Рида-Соломона имеет избыточность 6,7% ( $(255-239)/239 = 6,7\%$ ) Это позволяет использовать вероятность ошибки при BER  $10^{-12}$   $Q_{\text{э}} = 11,5\text{дБ}$ , т.е.  $Q_{\text{э}} = 3,6$ , что соответствует вероятности ошибки  $1,8 \cdot 10^{-4}$ . В результате получим увеличение длины по дисперсии для формата модуляции NRZ до 14,4 км:

$$L = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{3,42 \cdot Q_0^2 \cdot \beta_2} = 14,4 \text{ км}$$

При использовании второго поколения упреждающей коррекции ошибки при избыточности 11,1% и полученной вероятности ошибки  $2,1 \cdot 10^{-2}$  ( $(239-229)/229 + 255-239/239) = 0,04367 + 0,06694 = 11,1\%$ ,  $Q_{\text{э}} = 2,65$ . В этом случае для формата модуляции NRZ при скорости передачи 40 Гбит/с для ОВ G-655 получим расстояние по хроматической дисперсии, равное 15,5 км. При отрицательном кодировании усиления, при этом, получим 11 дБ, т.е. увеличение расстояния по затуханию на 40км.

При третьем поколении упреждающей коррекции ошибки получаем избыточность 23,6%,  $Q_{\text{э}} = 2,05$  и увеличение длины по хроматической дисперсии, равное 14,3 км. В результате допускается уширение передаваемого импульса при первом поколении упреждающей коррекции ошибки:

$\frac{T_1}{T_6} = \sqrt{1 + \left(\frac{1,85}{Q_3^2}\right)^2} = 1,453$ , т.е. можно допустить уширение импульса, равное 1,453 вместо 1,25 и допустимые потери вырастут до 1,62 дБ вместо 1 дБ.

При втором поколении упреждающей коррекции ошибки уже  $\frac{T_1}{T_6} = 1,584$ , т.е. допустимые потери вырастут до 2 дБ.

При третьем поколении упреждающей коррекции ошибки уже  $\frac{T_1}{T_6} = 1,72$ , т.е. допустимые потери вырастут до 2,35 дБ.

Во всех трех случаях отрицательное кодирование усиления позволяет увеличить длину элементарного кабельного участка свыше 40 км. Избыточность определяет процент увеличения длины элементарного кабельного участка по затуханию.

Значение отрицательного кодирования усиления определяется выражением:

$$17,3 - Q_3 + 10 \cdot \lg R, R < 1 \quad (3.5)$$

Так, например, при первом поколении кодирования  $R = 239/255 = 0,937$ , при втором поколении  $R = (229/239)(239/255) = 0,958 \cdot 0,937 = 0,898$ .

При использовании формата модуляции CRZ получим решение в виде:

$$l = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2 \cdot (1 + C^2)}{(1,85 \cdot Q_0^2)^2 \cdot \beta_2} \quad (3.6)$$

Так, при скорости передачи 40 Гбит/с,  $C=1$ ,  $d_m=0,5$ ,  $\beta_2=5\text{пс}^2/\text{км}$  и  $Q_3=3,6$  получим значение  $L=8,2\text{км}$ , а при втором поколении  $L=9,6\text{км}$ . Эти значения в 2 раза превышают значения, полученные для формата модуляции RZ.

Полученные результаты позволяют определить значения длины элементарного кабельного участка, при которой нет необходимости компенсировать хроматическую дисперсию. Однако, длина ЭКУ возрастает значительно за счет кодирования в данном случае усиления на 40 км и более.



Известно, что при скоростях 10-100 Гбит/с существующая поляризационная модовая дисперсия приобретает существенное значения, оказывая влияние на длину ЭКУ вследствие увеличения уширения передаваемого импульса. В первую очередь уменьшается дисперсионная длина и уменьшается общая длина линии. В таблице 3.5 приведены типовые значения параметров ПМД для оптического волокна баз компенсации дисперсии при норме на ПМД  $0,1T_6$ . Если норму увеличить до  $0,3T_6$ , то допустимые значения длин, приведенных в таблице 3, увеличатся в 9 раз. Более целесообразный путь увеличить норму для ПМД до  $0,15T_6$ .

Таблица 3.5. Зависимость L от ПМД

Скорость, Гбит/с	0,5 пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$
10	49 км	1225
40	3 км	78

При расчетах не учитывается ПМД усилителей и компенсирующих оптических волокон.

$$L_{\text{ПМД}} = \left( \frac{T_0}{D_{\text{ПМД}}} \right)^2 = \left( \frac{0,1 \cdot T_6}{2,83 \cdot x \cdot D_{\text{хд}}} \right)^2, \text{ где } T_0 = 0,1 \cdot \frac{T_6}{2,83} \quad (3.7)$$

Аналогично можно принять, что:

$$L_{\text{ПМД}} = \left( \frac{0,1 \cdot T_6}{2,83 \cdot x \cdot |\beta_2| \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2}} \right)^2 \quad (3.8)$$

При определении влияния ПМД на длину ЭКУ следует ориентироваться на допустимые значения. В результате получим:

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_m}{8 \cdot (1+x)\beta_2}, \text{ где } x = \frac{D_{\text{ПМД}} \cdot \lambda^2}{\beta_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot c} \quad (3.9)$$

Так, при  $D_{\text{ПМД}} = 0,5 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ ,  $\beta_2=5 \text{ пс}^2/\text{км}$  получим  $x=0,125$ .

$L_d = 222 \text{ км}$  с учетом влияния ПМД вместо  $250 \text{ км}$  без ПМД для скорости передачи  $10 \text{ Гбит/с}$  и формата модуляции NRZ.

При применении различных форматов модуляции и упреждающей коррекции ошибки необходимо учитывать влияние ПМД на дисперсионную длину и  $C$  следовательно, на длину компенсирующих оптических волокон.

### **3.2 Выбор оптимальной длины усилительного участка по затуханию в ОВ с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсии**

При разработке методики по компенсации хроматической дисперсии и поляризационной дисперсии следует исходить из конкретной линии, её длины, применяемой скорости передачи и методов модуляции. При выборе системы передачи, при скоростях передачи  $40\text{-}100 \text{ Гбит/с}$ , необходимо ориентироваться на оптические волокна с ненулевой смещенной дисперсией.

Из всего многообразия оптических волокон необходимо выбрать оптические волокна с большой эффективной площадью поперечного сечения сердцевин ОВ. Из приведенной таблицы видно, что наибольшей площадью поперечного сечения сердцевин обладают оптические волокна по рекомендации МСЭ-Т G-652: лучшее значение  $85 \text{ мкм}^2$ . Однако значение хроматической дисперсии составляет  $18 \text{ пс/нм}$  при  $\lambda=1550 \text{ нм}$ , что при таких высоких скоростях передачи ( $40\text{-}100 \text{ Гбит/с}$ ) требует серьезных и больших вкладов в решение по компенсации дисперсии. Поэтому, как отмечалось выше необходимо выбрать лучшее оптическое волокно по рекомендации G-655 ( $A_{\text{эфф}}=72 \text{ мкм}^2$ ). Это позволит сократить расходы на компенсацию хроматической дисперсии. Из всех оптических волокон большей площадью поперечного сечения сердцевин оптического волокна обладают волокна по рекомендации G-652:  $A_{\text{эфф}}=85 \text{ мкм}^2$ .

ОВ	$A_{эфф} (\lambda=1,55 \text{ мкм})$ мкм <sup>2</sup>
SMF	80
	55
DCF	21
	14
NZDS	72
G-652	Типовое 84
	Лучшее 85
G-655	Типовое 60
	Лучшее 72

При выборе оптического волокна G-655 с максимальной площадью поперечного сечения мы закладываем решения для будущих систем передачи для ВОСП-СР при скорости в канале до 1 Тбит/с. Вместе с тем при решении для скорости передачи 100 Гбит/с необходимо рассмотреть:

- длину рассматриваемой линии (400 км)
- характеристики ОВ по хроматической дисперсии в окне 1460..1625 нм (3 пс/нм·км)
- характеристики ОВ по поляризационной модовой дисперсии (0,2 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ )
- характеристики использованных (предпочтительно) ОВ для компенсации дисперсий
  - а) по затуханию дБ/км
  - б) по хроматической дисперсии (пс/нм·км)

в) по поляризационной дисперсии (пс/ $\sqrt{\text{км}}$ )

- характеристики усилителей по поляризационной модовой дисперсии

- метод модуляции для передачи

- метод предварительной коррекции ошибки

и ряд других вопросов, связанных с проектированием ВОЛП.

Зная возможности системы передачи по затуханию, выбираем длину усилительного участка, равную 80 км. При этом мы знаем, что, несмотря на выбранный способ модуляции, система не проходит по хроматической дисперсии. Определим:

$$l_{ga} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (3.10)$$

без учета формата модуляции для скорости 100 Гбит/с:

$$l_{ga} = \frac{T_6^2}{8 \cdot |\beta_2|} = 3,5 \text{ км при } |\beta_2| = 3,5 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$$

а для скорости 40 Гбит/с:

$$l_{ga} = 22,4 \text{ км}$$

При увеличении скорости передачи в 2,5 раза, дисперсионная длина уменьшается в 6 раз, а при увеличении скорости в 10 раз, дисперсионная длина увеличивается в 100 раз.

1. Небольшие значения хроматической дисперсии ( $\geq 2$  пс/нм·км) необходимо иметь в ОВ для уменьшения в системах DWDM четырехволнового смешивания и перекрестной фазовой модуляции. Для ОВ по рекомендации G-655 МСЭ величина хроматической дисперсии значительно меньше в окне прозрачности 1550 нм, чем в ОВ по рекомендации МСЭ G-652, поэтому только 0,25 D1 необходимо компенсировать по сравнению с ОВ по рекомендации МСЭ G-652, т.е. в линии

требуется меньше компенсаторов хроматической дисперсии которые необходимы для восстановления формы сигнала и меньшее значение ПМД<sub>ср</sub> с учетом усилителей и компенсаторов для данной линии.

2. В этом случае для линии будет получено меньшее значение ПМД<sub>ср</sub> которая влияет на распространение сигнала.

3. Эффективная площадь волокна, если область распространения оптической мощности, при которой нелинейные эффекты не ограничивают скорость передачи и расстояние между регенераторами и только волокна для компенсации дисперсии ограничивают передаваемую по ОВЛ мощность. Эффективная площадь ОВ определяется выражением

$$A_{эфф} = k \cdot \pi \cdot w^2 \cdot (\lambda) \quad (3.11)$$

где k- поправочный коэффициент, зависящий от длины волны и фактического коэффициента преломления профиля ОВ. Он меняется в пределах  $0,95 \leq k \leq 1,03$ .

Отношение сигнал/шум с одинаковыми длинами усилительных участков и с эрбиевыми усилителями определяются известной формулой:

$$C/Ш = 58 + P_k(\text{дБ}_M) - NF(\text{дБ}) - S \cdot \alpha \cdot l_{yy}(\text{дБ}) - 10 \cdot x \cdot \lg N \quad (3.12)$$

Где

$P_k$  обычно принимается 0 дБм,

NF – коэффициент шума лежит в пределах 3-6 дБ,

S- число длин усилительных участков,

A- коэффициент затухания оптического волокна с учетом неразъемных соединений,

$L_{yy}$  –длина усилительного участка, км,

X –число усилительных пунктов,

N-число усилителей.

ОС/Ш связано с характеристиками ОВ:

$$C/Ш = 10 \cdot \lg \left( \frac{A_{эфф}}{n_2} \right) - \alpha \cdot l_{yy} \quad (3.13)$$

Для большого значения C/Ш ОВ должно иметь большую  $A_{эфф}$  низкий  $n_2$  и низкий коэффициент затухания. Этими характеристиками обладает волокно Corning SMF-28ULL (массовое затухание и малый  $n_2$ )-волокно G-652 и волокно G-655 – Corning LEAF.

Таблица 3.6. Значения нелинейного коэффициента для ОВ G-652, G-655

Категория МСЭ-Т	ОВ	$\alpha(1550\text{нм})$ дБ/км	$A_{эфф}$ мкм <sup>2</sup>	$n_2$ М <sup>2</sup> /Вт
G-652	типовое	$\leq 0,19$	84	$2,3 \cdot 10^{-20}$
	лучшее	$\leq 0,17$	85	$2,1 \cdot 10^{-20}$
G-655	типовое	$\leq 0,22$	60	$2,3 \cdot 10^{-20}$
	лучшее	$\leq 0,20$	72	$2,3 \cdot 10^{-20}$

Для качественной передачи оптических сигналов на высоких скоростях передачи необходимо знать требования, предъявляемые к оптическому волокну:

- дисперсионную длину  $L_g$ , км для выбранной системы модуляции;
- нелинейную длину  $L_{нл}$ , км;
- эффективную длину  $L_{эфф}$ , км;
- длину по поляризационной модовой дисперсии  $L_{пмд}$ , км;
- длину по затуханию,  $L_a$ , км

- отношение сигнал/шум в оптическом канале для данной системы передачи и данного ОВ;
- отношение сигнал/шум в электрическом канале;

При определении отношения сигнал/шум в электрическом и оптическом каналах необходимо знать:

1. допуск на хроматическую дисперсию при потерях на эту дисперсию 1-2 дБ;
2. наличие нелинейных эффектов;
3. длина усилительного (регенерационного) участка по затуханию;
4. формат модуляции;
5. наличие предварительной коррекции ошибки 1-3 поколений;
6. выбор расстояния между каналами в зависимости от скорости передачи и системы передачи ВОСП-СР;

Дополнительные потери оптического тракта усиливают деградацию источника излучения, а минимальный уровень приема гарантирует величину коэффициента ошибок регенератора.

Максимальный уровень приема ограничивает перегрузку фотоприемника. Максимальное затухание регенерационного участка равно:

$$A_{\text{макс}} = 2 \cdot A_p + n \cdot A_{\text{нр}} + \alpha \cdot l_{\text{ргу}} + A_t + A_z, \text{ дБ} \quad (3.14)$$

Где  $A_p$ - затухание разъемного соединения, дБ;

$A_{\text{нр}}$ - затухание неразъемного соединения;

$L_{\text{ргу(уу)}}$ - длина РГУ или УУ, км;

$A_t$ - допуск на изменение затухания по температуре, дБ (0,5-1,5 дБ)

$A_z$ - запас по затуханию на ухудшение параметров ВОЛП со временем (5-6 дБ)

Отсюда:

$$l_{\text{pгу}(yy)} = \frac{\mathcal{E} + A_H + 2 \cdot A_P - A_{31}}{\alpha + \frac{A_P}{l_{c \cdot g}}} \quad (3.15)$$

Где  $A_{31} = A_t + A_3$

При выборе модуляции DPSK (квадратурно-фазовой модуляции) мы получим 2 бита на символ, что позволяет разделить скорость на 2, т.е. при скорости 40 Гбит/с получим 2 составляющих по 20 Гбит/с, а при скорости 100 Гбит/с, получим 2 составляющих по 50 Гбит/с. Это позволяет уменьшить требования по хроматической дисперсии и ее компенсации.

Так при скорости 20 Гбит/с,  $l_g=89$  км, а при скорости 50 Гбит/с,  $l_g=14,2$  км.

Исходя из реальной реализации при скорости 40 Гбит/с возможно решение по  $l_{yy}=80$  км без применения компенсаторов дисперсии на линии, что нельзя создать для скорости 100 Гбит/с. Поэтому наиболее эффективным решением является применение PM-DQ PSK (поляризационное мультиплексирование с применением дифференциальной квадратурно фазовой модуляции).

Сигнал со скоростью 100 Гбит/с раскладывается на два поляризационных сигнала на одной и той же частоте с отклонением на 90 градусов друг от друга. Один сигнал передается со скоростью 50 Гбит/с с горизонтальной поляризацией(x), а другой 50 Гбит/с - с вертикальной поляризацией(y).

Решение на базе модуляции DQPSK и CP-DQPSK поддерживаются на транспортной платформе Cisco ONS 15454 MSTP и предназначены для использования в городских и региональных (RZ-DQPSK), а также магистральных (CP-DQPSK) сетях большой протяженности. Отличительной особенностью модуляции RZ-DQPSK является возможность ее совместного использования с каналами 10G, в то время как в случае использования CP-DQPSK на расстояниях более 900 километров необходимо предусмотреть частотное разнесение каналов (Guard Band) или специальный расчет (конфигурацию) сети. Рассмотрим механизмы работы модуляции CP-DQPSK более подробно.



За общим названием CP-DQPSK кроется набор технологий, состоящий из трех основных компонентов, а именно: двойная поляризация, модуляция DQPSK и когерентный прием с использованием специализированного цифрового сигнального процессора (DSP).

Таблица 3.7. Сравнение различных модуляций для 40G каналов

Характеристика	10G NRZ	DPSK	RZ-DQPSK	CP-DQPSK
Совместимость с 50 ГГц	Да	Да	Да	Да
Дальность (км)	$\geq 2000$	$\geq 1000$	$\geq 1000$	$\geq 2000$
Устойчивость к хроматической дисперсии (пс/нм)	+/-800	+/-700(TDC)	+/-700(TDC)	$\geq 30000$
Устойчивость к поляризационно-модовой дисперсии (пс)	10/14	2,5/3,5	6/8	$\geq 30$

Поляризационное мультиплексирование, более известное как двойная поляризация. Этот механизм позволяет передавать сигнал, раскладывая его на два поляризационных сигнала на одной и той же частоте с отклонением на 90 градусов друг от друга. Один сигнал (X) передается с горизонтальной поляризацией, а второй (Y) – с вертикальной. Эти два сигнала могут объединяться или разделяться с помощью специальных сплиттеров. Каждая поляризация позволяет кодировать один бит на символ, и объединение двух, соответственно, обеспечивает модуляцию двух битов на символ. Эти два сигнала объединяются и разъединяются с помощью специальных поляризационных сплиттеров. Каждая поляризация кодирует один бит на символ, а объединение сигнала обеспечивает два бита на символ.

Модуляция на базе QPSK обеспечивает передачи двух бит на символ каждой поляризации. В результате объединения этих двух решений мы получим 4 бита на символ.

При применении модуляции QPSK на скорости 40 Гбит/с расстояние 80 км между усилителями может быть пройдено с применением предварительной коррекции ошибки.

Первое поколение ПКО(FEC) дает нам увеличение скорости передачи в 1,07 раза, при этом вероятность ошибки может быть принята  $1,5 \cdot 10^{-4}$ . При этом:

$$Q_0 = 1,39 = \frac{T_6}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l}} = \frac{50}{2 \cdot \sqrt{3,5 \cdot l \cdot 1,07}} = \frac{2500}{3,42 \cdot 3,5 \cdot l}$$

$$l = 85,5 \text{ км}$$

При выборе  $l$  между усилителями 100 км можно выбрать второе поколение ПКО, в этом случае:

$$Q_0 = 1,28 \quad l = 100 \text{ км}$$

Т.е. при скорости 10 Гбит/с и модуляции QPSK можно избежать применения компенсаторов дисперсии, но при формате модуляции NRZ, однако пи формате RZ, более защищенным от поляризационной модовой дисперсии, расстояние уменьшается в два раза и требуется компенсация. Реально считается, что усилители и каждый компенсатор вносят свой вклад в суммарную величину ПМД: усилитель – 0,5 пс, компенсатор -1 -2 пс в зависимости от длины волокна для компенсации.

Волокно G-655 имеет значение ПМД, равное  $0,2 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ . В результате получаем:

$$\text{ПМД}^2 = \sqrt{\frac{(\text{ПМД}_{\text{ОВ}} \cdot \sqrt{l})^2 + n \cdot (\text{ПМД}_{\text{уу}})^2 + n_1 \cdot (\text{ПМД}_{\text{KD}})^2}{l_{\text{линии}}}} \leq 0,464 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

При  $n=n_1=5$

При каждой скорости соблюдается норма по ПМД  $0,1 T_6$  при длине линии без учета элементов линии.

Таблица 3.8 ПМД и скорость передачи

Скорость В Гбит/с	10	20	25	40
ПМД= $0,1/V$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,5	0,25	0,2	0,125
ПМД= $0,15/V$ пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,75	0,375	0,3	0,1875

Полученные результаты позволяют при высоких скоростях передачи с помощью методов модуляции уменьшить или в ряде случаев исключить влияние ПМД и значительно уменьшить хроматическую дисперсию при длине усилительного участка 80-100 км.

Формат модуляции RZ имеет более широкую полосу частот чем формат модуляции NRZ и поэтому больше подвержен воздействию хроматической дисперсии и наклон этой дисперсии труднее компенсировать, но так как средняя оптическая мощность в ОВ постоянна, то амплитуда мощности формата модуляции 05RZ будет в 2 раза больше амплитуды (пиковой мощности) формата модуляции NRZ на 3 дБ больше, но из-за дробового шума усилителей эта величина будет меньше и составит 2,5 дБ. Так как энергия сигнала формата модуляции сосредоточена ближе к центру битового периода формат модуляции RZ более стоек к воздействию ПМД, чем NRZ.

Так при норме ПМД =  $0,1 T_6$

NRZ  $L_{\text{пмд}} = (0,15T_6 / \text{ПМД})^2$  при 1 дБ потерь

05RZ  $L_{\text{пмд}} = (0,3T_6 / \text{ПМД})^2$  при 1 дБ потерь

033RZ Лпмд =  $(0,45T_6/\text{ПМД})^2$  при 1дБ потерь

Функция вероятной плотности (ФВП) дифференциальной групповой задержки (ДГЗ) определяется выражением:

$$\text{ФВПДГЗ} = 8/\pi^2 \text{ДГЗ} (2\text{ДГЗ}/\text{ДГЗ}_{\text{норма}})^2 e^{-(2\text{ДГЗ}/\text{ДГЗ}_{\text{норма}})^2/\pi} \quad \text{при ДГЗ} > 0 \quad (3.16)$$

Параметр Q связан с коэффициентом вероятности ошибки известным выражением и приведенным графиком с вероятностью ошибки BER. Так, для вероятности ошибки  $10^{-10}$   $Q=6,4$  следует связать параметр Q с электрическим значением отношения сигнал/шум. Это отношение особенно простое, когда в приемнике доминирует термический шум (в PIN-приемнике). В этом случае  $\text{SNR} = 4Q^2$  и понятие Q интерпретируется как 164 или  $20 \lg 2Q = 22,2$  дБ в электрической части приемника. Вместе с тем  $Q^2$  (дБ) =  $20 \lg Q = 16,2$  дБ – минимальное значение в оптической части.

Таким образом:

$$\text{OSNR}_{\text{эл}}, \text{дБ} = 20 \lg Q_{\text{он}} + 6 \text{дБ} = 22,2 \text{дБ}$$

$$\text{OSNR}_{\text{эл}}, \text{дБ} = \text{OSNR}_{\text{опт}} + 6 \text{дБ}$$

Для электрической полосы пропускания в [28, 91] получено эмпирическое выражение для отношения сигнал/шум (ОСШ):

$$\text{ОСШ}_{\text{дб}} = 10,65 + 11,42 \cdot \lg(-\lg P_{\text{ош}}) \quad (3.17)$$

где  $P_{\text{ош}} = 10^{-K}$ , где  $4 < K < 15$

В оптическом канале оптическая полоса пропускания будет в два раза шире, и следовательно:

$$\text{ОСШ}_{\text{опт}} = \text{ОСШ}_{\text{эл}} - 6 \text{дБ};$$

$$\text{ОСШ}_{\text{опт}} = 10 \lg Q^2 = 20 \lg Q \quad (3.18)$$

где  $Q$  – фактор-параметр, табулированный относительно вероятности ошибки  $P_{ош}$  :

$$P_{ош} = K_{ош}(Q)$$

$$ОСШ_{эл} \cong 10,65 + 11,42 \lg(-\lg 10^{-12}) = 22,97 \text{ дБ}$$

Таблица 3.9. Q-фактор и вероятность ошибки (BER)

<b>Q ,разы</b>	<b>20lg Q,дБ</b>	<b>BER</b>
2,3	8,0	$10^{-2}$
3,1	9,54	$10^{-3}$
3,5	10,9	$10^{-4}$
4,0	12,04	$10^{-5}$
4,5	13,1	$10^{-6}$
5,0	14,0	$10^{-7}$
5,5	14,8	$10^{-8}$
6,04	15,6	$10^{-9}$
6,4	16,12	$10^{-10}$
6,8	16,6	$10^{-11}$
7,1	17,0	$10^{-12}$
7,4	17,4	$10^{-13}$
7,7	17,7	$10^{-14}$
8,0	18,0	$10^{-15}$

Использование решения, которое связывает допустимые расстояния с Q-фактором, позволяет выбрать необходимое расстояние для требуемого значения вероятности ошибки.

Так как  $T_0 = 0,3536T_b,нс$ , где  $T_b$  - битовый интервал, можно записать,

$$\text{что } L_0 = 0,125 \frac{T_b^2}{|\beta_2|}, км$$

Кроме того, учитывая различные форматы модуляции, можно ввести в  $L_0$  параметр  $d_M$ .

$$\text{В этом случае } L_0 = 0,125 \frac{T_b^2 d_M^2}{\beta_2}, км$$

где  $d_M$  - параметр формата модуляции

Для широкополосных источников, в таблице 3.10 представлена зависимость  $L_0$  от  $\Delta\lambda$  для формата модуляции NRZ:

Таблица 3.10 Зависимость  $L_0$  от  $\Delta\lambda$  при NRZ

$\Delta\lambda, нм$	1	0,1	0,01	0,02	0,0255	0,03	0,04	0,05
$L_0, км, STM64$	1,47	14,7	147	73,5	57,6	49	36,75	29,4
$Z, км$	1,12	11,2	112	56	44,2	37,3	28	22,4

Во всех этих случаях Q-фактор будет равен 6.

Значение  $\beta_2$  для оптических волокон по рекомендациям МСЭ-Т G-652D, G-655C и G-656 приведены в таблице 3.11, вместе с параметром  $D$  для длины волны 1,55 мкм и для формата модуляции NRZ:

Таблица 3.11 ОБ для СИМ-64 и Ld

Вид ОБ		G-652D	G-655C	G-656
$\beta_2, \text{нс}^2/\text{км}$		21,7	7,7	17,9
$D \frac{\text{нс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$		17	6	14
$L_0, \text{км}$	STM-64	57,6	162	69,9
	STM-256	3,6	10,2	4,4

В этой же таблице приведены дисперсионные длины для двух скоростей передачи STM-64 и STM-256.

При распространении Гауссовского импульса по ОБ он сохраняет свою форму и имеет вид:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left( \frac{Z}{L_D \cdot d_m^2} \right)^2} \quad (3.19)$$

где  $Z$  - длина, на которой он приобретает значение  $T_1$

Согласно рекомендациям МСЭ-Т необходимо, чтобы при уширении импульса терялось на дисперсионное уширение 1 дБ. Это соответствует решению, при котором отношение  $\frac{T_1}{T_0} = 1,26$ . Отсюда следует соотношение  $\frac{Z}{L_0} = 0,767$ . В этом случае мы получим потери на дисперсионное уширение, равное 1 дБ.

Кроме того, это означает, что вероятность ошибки на приеме будет не больше  $10^{-9}$  на выходе ОБ.

Величина отношения сигнал/шум в этом случае определяется значением  $Q^2 = 6$ , что подтверждается простым выражением:

$$Q^2 = \frac{k \cdot L_d}{Z} \quad (3.20)$$

Вместе с тем, это значение получено для узкополосных источников. Узкополосные источники соответствуют значению  $\Delta\lambda \leq 0,0255\text{нм}$ , широкополосные источники соответствуют значению большему, чем  $\Delta\lambda \geq 0,0255\text{нм}$ . В этом случае получим значение:

$$L_d = \frac{T_0 \cdot d_m}{4 \cdot D \cdot \Delta\lambda}, \text{ км} \quad (3.21)$$

а выражение для параметра сигнал/помеха будет иметь вид:

$$Q = \frac{2,83 \cdot T_0 \cdot d_m}{2 \cdot D \cdot \Delta\lambda \cdot Z} \quad (3.22)$$

Полученный результат позволяет при расстояниях, равных  $L \leq L_0$  определиться с длиной усилительного или регенерационного участков.

Известно [91], что длина регенерационного участка равна:

$$l = \frac{S - 2 \cdot \alpha_p - S_1 - S_2 - S_3}{\alpha_{об} + \frac{\alpha_{н.р.}}{l_{с.д.}}}, \text{ км} \quad (3.23)$$

где  $S$  – допустимый энергетический потенциал,  $\partial B \sim 30\text{дБ}$  (передача-прием),

$S_1$  - энергетический запас на старение и ремонт, равный 3- 6дБ,

$\alpha_p$  - затухание разъемного соединителя, 0,3 дБ,

$\alpha_{н.р.}$  - затухание неразъемного соединителя, 0,1 дБ,

$\alpha_{об}$  - коэффициент затухания оптического волокна,

$l_{с.д.}$  - строительная длина оптического кабеля, км,

$S_2$  - потери за счет дисперсии, дБ,



$S_3$  - дополнительные потери за счет других эффектов, дБ ,

Согласно рекомендациям МСЭ-Т G-957 для  $\lambda = 1,55$  принимается средняя величина дисперсионного параметра не  $17 \text{ пс}/_{\text{нм} \cdot \text{км}}$ , а  $20 \text{ пс}/_{\text{нм} \cdot \text{км}}$ , а

$$\alpha_{OK} + \frac{a_{н.р.}}{l_{с.д.}} = 0,275 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$$

Оставим значение  $17 \text{ пс}/_{\text{нм} \cdot \text{км}}$  и примем  $\alpha_{OK} + \frac{a_{н.р.}}{l_{с.д.}} = 0,275 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$

Запас на ремонт и старение аппаратуры, и кабеля  $S_1 = 6 \text{ дБ}$  и приняв  $S_2 = 1 \text{ дБ}$  за счет дисперсии, пренебрежем нелинейными эффектами  $S_3$  и получим:

$$l_{pr} = \frac{S - 2a_p - S_1 - S_2}{0,275} = 81,5 \text{ км}$$

Для скорости передачи STM-64 примем  $l_{pr} = 80 \text{ км}$ .

Вместе с тем, длину регенерационного участка определяет дисперсия, и эта длина для скорости передачи 10 Гбит/с составляет 44,2 км.

Для достижения длины 80 км необходимо проложить 36 км ОВ с  $D = -17 \text{ пс}/_{\text{нм} \cdot \text{км}}$ , либо проложить 80 км ОВ, потеряв на дисперсию ~2дБ, поставить предусилитель перед компенсирующим ОВ и на вход фотоприемника поступит сигнал восстановленной амплитуды до уровня затухания на длине  $l=44,2$  и восстановленный по дисперсии на длине 80 км.

Поставленный предусилитель должен скомпенсировать потери в компенсирующем ОВ. Так, DCM-40 (компенсируемая длина 40 км; полная дисперсия  $-658 \text{ пс}/_{\text{нм}}$ ) вносит затухание 5 дБ. Целесообразно проверить данное решение с помощью таких же эмпирических формул.

Зная вероятность ошибки, равную  $10^{-9}$  и зная  $Q=6$  (это соответствует  $2Q=12$ ), определим значение отношения сигнал/шум в дБ:

$ОСШ = 10,65 + 11,42 \lg(-\lg 10^{-9}) = 20,75 \text{ дБ} = 14,75 \text{ Дб}$ .  $Q = 2,35$  в оптическом канале

ООСШ для  $Q^2=6 \approx 7,78 \text{ дБ}$ .  $Q = 2,45$  в оптическом канале

Другими словами, полученное решение полностью соответствует решениям, полученным по эмпирической формуле.

- 1) Ограничения, накладываемые дисперсионной и нелинейной длиной позволяют выбрать необходимый формат модуляции при передаче.
- 2) Полученное простое выражение гауссовского импульса позволяет:
  - определить потери мощности сигнала,
  - определить допустимый параметр Q-фактор,
  - определить отношение сигнал/шум и следовательно, вероятность ошибки для различных форматов модуляции как для широкополосных, так и для узкополосных источников.
- 3) Представленный алгоритм определения хроматической дисперсии в оптическом волокне с учетом скорости передачи системы позволяет определить допустимую длину по дисперсии с учетом форматов модуляции.
- 4) Основы распространения сигнала в оптическом канале учитывают распространение сигнала гауссовской формы импульсов для различных форматов модуляции.

### **3.3 Методика расчета компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий**

#### **3.3.1 Методика расчета компенсации ХД с помощью компенсирующих ОВ**

Общую дисперсию и затухание линии можно представить в виде формул:

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{ов}} \cdot L_{\text{ов}} + D_{\text{овкд}} \cdot L_{\text{овкд}} \quad (3.24)$$

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha_{\text{ов}} \cdot L_{\text{ов}} + \alpha_{\text{овкд}} \cdot L_{\text{овкд}} \quad (3.25)$$

Если требуется компенсация дисперсии, то длина  $L_{\text{овкд}}$  выбирается таким образом, чтобы  $D_{\text{общ}}=0$ .

Однако, из-за нелинейных эффектов и возможной модуляции в передатчике полная компенсация не всегда оптимальна. В случае использования ОВКД для дискретной компенсации в усилителе общим недостатком ОВКД является увеличение затухания оптического сигнала. Добавочное затухание должно быть скомпенсировано добавочным усилением оптического усилителя (ОУ), что приводит к деградации отношения сигнал/шум и увеличению стоимости системы в целом. Для преодоления этой проблемы ОВКД важно иметь как можно более значительную отрицательную дисперсию и низкое затухание.

Мера качества ОВКД – FOM определяется как:

$$FOM = \frac{D_{\text{овкд}}}{\alpha_{\text{овкд}}} \quad (3.26)$$

При выборе  $L_{\text{овкд}}$  так, что  $D_{\text{общ}}=0$ , общие потери определяются:

$$\alpha_{\text{общ}} = \left( \alpha_{\text{ов}} + \frac{D_{\text{овкд}}}{\alpha_{\text{овкд}}} \right) \cdot L_{\text{ов}} \quad (3.27)$$

Для многоканальных высокоскоростных WDM систем компенсация дисперсии необходима в широком диапазоне длин волн. Это означает, что кроме дисперсии, также необходимо компенсировать наклон дисперсионной характеристики.

Общий наклон характеристики дисперсии определяется:

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{ов}} \cdot L_{\text{ов}} + S_{\text{овкд}} \cdot L_{\text{овкд}} \quad (3.28)$$

Отсюда видно, чтобы достигнуть компенсации наклона дисперсионной характеристики необходимо иметь отрицательный наклон ОВКД.

Если длина ОВ выбрана так, что  $D_{\text{общ}}=0$ , то для компенсации наклона  $S_{\text{ОВ}}$  необходимо, чтобы:

$$R \cdot D_{\text{ОВ}} \cdot S_{\text{ОВ}} = R \cdot D_{\text{ОВКД}} \cdot S_{\text{ОВКД}} \quad (3.29)$$

$$\text{где } R \cdot D \cdot S = \frac{S}{D}$$

В таблице 3.12 приведены значения для различных ОВ.

Таблица 3.12. Типовые значения дисперсионных характеристик ОВ.

Тип ОВ	Дисперсия пс/нм·км	Наклон дисперсии пс/нм <sup>2</sup> ·км	RDS 1/нм
6-652	17	0,052	0,0034
True-wave-RS	4,5	0,045	0,010
LEAF	4,2	0,09	0,021

Известны два типа ОВКД. Первый тип ориентирован на одну моду и имеет малый диаметр сердцевины и малое значение нормированной частоты  $V = 1$ . Второй тип поддерживает 2 и более мод и  $V > 2,405$  (например . 2,5).

При первом типе большая часть моды распространяется по оболочке, значительно увеличивая волноводный вклад в общую дисперсию и приводя к большой величине отрицательной дисперсии. Дипрессированная оболочка часто используется в практике создания ОВКД. Значение параметра хроматической дисперсии ниже -100 пс/нм·км может быть реализовано уменьшением диаметра сердцевины ОВ и регулированием параметров дипрессированной оболочки. Наклон дисперсионной характеристики  $S$  около длины волны 1,55 мкм может быть сделан отрицательным и изменяться значительно подбором параметров  $S/D$  ОВКД для различных типов ОВ.

Несомненно, такие типы ОВКД приводят к трем проблемам, связанным с малым диаметром сердцевины ОВКД.

1. Большое вносимое затухание за счет того, что большая часть моды распространяется по оболочке ОВКД ( $\alpha = 0,4 - 0,6$  дБ/км). Соотношение  $D/\alpha$  часто используется как мера оценки ОВКД. Ясно, что это соотношение должно быть как можно больше и величина  $>250$  пс/нм·км была реализована на практике.
2. Эффективная площадь сердцевины ОВКД  $A_{\text{эфф}}$  порядка  $20$  мкм<sup>2</sup>. Так как нелинейный параметр  $\gamma = 2\pi n_2/\lambda A_{\text{эфф}}$  больше в 4 раза для ОВКД по сравнению со стандартным ОВ, то оптическая интенсивность также больше для данной входной мощности и нелинейные эффекты увеличиваются значительно внутри ОВКД.
3. При интенсивном внедрении ВОСП-СР и увеличении суммарной входной мощности вследствие малого диаметра сердцевины ОВКД именно на ОВКД возможен пробой сердцевины ОВКД.

Практическое решение для существующих ВОСП-СР, работающих на стандартном ОВ, состоит в добавлении ОВКД модулей (с 6-8 км ОВКД) к оптическим усилителям, расположенным через 60-80 км. ОВКД модули компенсируют хроматическую дисперсию, тогда как усилитель компенсирует затухание ОВКД модуля, так и ОВ. Эта схема достаточно привлекательна, но подвержена воздействию нелинейных эффектов. Включенные потери ОВКД модуля часто превышают 5 дБ. Эти потери компенсируются увеличением усиления усилителя или двухкаскадным усилением для того, чтобы избежать спонтанной эмиссии усилителя.

Входная мощность должна быть относительно низкой для того, чтобы избежать нелинейных эффектов, т.е. длина линии ограничивается спонтанным шумом усилителей.

Для компенсации дисперсии используется ОВ со ступенчатым профилем с модовым полем на  $\lambda=1,55$  мкм, диаметра 5 мкм с простой кварцевой оболочкой (1-ая – глубоко депрессированная; вторая – увеличенный показатель преломления, и третья – стандартный показатель преломления). Большой коэффициент  $\Delta$  способствует созданию высоко отрицательной дисперсии, но приводит к увеличению затухания. Выбор диаметра сердцевины должен быть компромиссным. Часто нормированная частота  $V=1$ . Уменьшение диаметра сердцевины ОВ, увеличивает глубину отрицательной дисперсии, но увеличивает чувствительность к радиусу изгиба. Глубоко депрессивное покрытие уменьшает дисперсию и является необходимым для получения отрицательного наклона дисперсии при  $\lambda=1,55$  мкм. Увеличение показателя преломления кольцо уменьшает чувствительность к радиусу, но увеличивает длину волны отсечки. Особенно  $LP_{02}$  длина волны отсечки увеличивается и будет обычно выше, чем для  $LP_{11}$ . Три типа ОВКД реализованы: стандартное ОВ с максимумом FOM, широкополосное ОВКД с полной компенсацией наклона дисперсии стандартного ОВ и большим наклоном ОВКД для ОВ с ненулевой смешанной дисперсией. Результаты приведены в таблице 3.13:

Таблица 3.13 Типовые результаты для  $\lambda=1,55$  мкм

	Стандарт ОВКД	Широкополо сные ОВКД	Высокий наклон дисперсии ОВКД
RDS 1/нм	0,0022	0,0035	0,0067
FOM пс/нм·дБ	200	190	150
$\alpha$ на	0,5	0,5	0,68

1,55мкм dB/km			
D на 1,55мкм пс/нм·км	-100	-95	-100
d модового поля мкм	5,2	5,1	4,5
$\overline{PMD}$ $1/\sqrt{пс \cdot км}$	0,08	0,08	0,08

В практическом применении ОВКД затухание, которое используется для расчета FOM, должно включать не только потери ОВ, но и потери соединения. Учитывая разницу в диаметре модовых полей ОВ (10.5мкм) и ОВКД(5мкм) потери в механическом соединении можно уменьшить до 0,7-0,8 дБ. Эти потери можно уменьшить до 0,5 дБ вводя несколько метров специального промежуточного ОВ. Промежуточное волокно имеет диаметр модового поля меньше 10,5 мкм.

Несколько новых схем предложено для того, чтобы разрешить проблемы, связанные со стандартным ОВКД. В одной схеме ОВКД создается с двумя концентрическими сердечниками, разделенными оболочкой кольцевой формы. Относительная разница показателей преломления сердцевина – оболочка больше для внутренней сердцевины ( $\Delta_{внутр.} = 2\%$ ) по сравнению с внешней сердцевиной ( $\Delta = 0,3\%$ ), и размеры сердцевин выбираются так, что каждая сердцевина поддерживает одну моду. Три радиуса этой схемы а, в, с с показателями преломления  $n_1, n_2, n_3$  могут быть оптимизированы для получения необходимого значения параметра хроматической дисперсии. Так для величины  $D = - 4700$

пс/нм·км на  $\lambda = 1,55\text{мкм}$   $a=1\text{мкм}$ ,  $b=15,2\text{мкм}$ ,  $c=22\text{мкм}$ ,  $\Delta_{\text{вну}} = 2\%$ ,  $\Delta_{\text{вне}} = 0,3\%$ . Диаметр моды составляет 9 мкм, что очень близко к диаметру моды стандартного ОВ для  $\lambda=1,554\text{ мкм}$ . ОВКД с  $D= - 1800\text{пс/нм·км}$  было создано еще в 2000 году и достаточно было 1 км длины для компенсации дисперсии 100 км стандартного ОВ. Потери от включения такой малой длины ОВКД незначительны.

Волокна для компенсации дисперсии имеют следующие недостатки:

1. Малый диаметр ОВ приводит к нелинейным эффектам из-за большой мощности вводимой в это ОВ.
2. Это ОВ имеет довольно большие потери ( $0,5 \frac{\text{дБ}}{\text{км}}$ ) по сравнению с ОВ, дисперсию которого компенсируют.
3. 1 км этого волокна может скомпенсировать до 10 км стандартного ОВ.

Эти проблемы решаются с помощью двухмодового ОВ ( $V=2,5$ ), имеющего эллиптическую форму сердечника. Такое волокно (1 км) способно скомпенсировать 40 км стандартного ОВ, исключив вышеуказанные 3 проблемы. Однако, двухмодовое ОВ требует применение модового трансформатора для передачи фундаментальной моды на линии без потерь, на моды высшего порядка. Альтернативным решением могут быть чирпированная брегговская решетка. Для широкополосных решений необходимо чтобы:

$$\beta_{21} \cdot l_1 + \beta_{2k} \cdot l_{2k} = 0 \quad (3.30)$$

$$\beta_{31} \cdot l_{21} + \beta_{3k} \cdot l_{2k} = 0 \quad (3.31)$$

$$\beta_{3k} = -\frac{L_1}{L_2} \cdot \beta_{31} \quad (3.32)$$

При этом для удовлетворения этих условий следует использовать реверсивные ОВК с отрицательным значением  $\beta_3$ . Волоконные брегговские решетки, жидкокристаллические модуляторы и другие устройства могут быть использованы для этих целей.



При компенсации дисперсии с помощью ОВКД два основных направления функционируют [3,5],

1. ОВКД, поддерживает одну моду, но создано с очень малым параметром  $V=1$ , при этом затухание такого волокна составляет  $\alpha = 0,4 - 0,6$  дБ/км, отношение  $|D|/\alpha = FOM$  является основной мерой оценки ОВКД и получены значения  $\sim 360$  пс/нм\*дБ. Практическое решение магистральных ВОЛС позволяет добавлением к стандартному ОВ (6-652) 6-8 км ОВКД получить расстояние между оптическими усилителями 60-80км при скоростях передачи до 5-10 Гбит/с.

Недостатки таких ОВКД следующие:

- Потери от включения ОВКД составляют  $>5$  дБ.
- Вследствие малой эффективной модовой площади ОВКД ( $\sim 20$  мкм<sup>2</sup>) увеличиваются нелинейные эффекты.

2. Проблемы ОВКД могут быть разрешены путем использования двух модового ОВ, созданного с величиной  $V = 2,5$ . Такие волокна имеют те же потери, что и обычные ОВ, но параметр  $D$  может составлять  $\sim -700$  пс/нм\*км для волокон с эллиптической формой сердечника. Один километр ОВКД такого типа может скомпенсировать дисперсию групповых скоростей для 40 км линии с добавлением незначительных потерь по сравнению с ОВКД одной моды. При этом, поддерживаются моды LP01, LP11. Эти волокна имеют те же потери, что и одномодовое стандартное ОВ и могут быть выполнены так, что параметр  $D$  для моды LP 11 будет иметь большую отрицательную величину. Так  $D = -770$  пс/нм\*км получена в 1994 году для ОВКД с эллиптическим сердечником и 1 км такого волокна компенсирует хроматическую дисперсию стандартного ОВ на длине 45 км с относительно малым значением вносимого затухания и нелинейной деградацией. Использование двухмодовых ОВКД требует устройств по преобразованию мод, способных преобразовывать оптический сигнал от фундаментальной моды к моде высшего порядка, поддерживаемой ОВКД.

Всеволоконная природа устройств по преобразованию мод важна для поддержания потерь от включения на требуемом уровне. Добавочные требования к модовым преобразованиям: поляризационная чувствительность и работа в широкой полосе.

Почти все модовые преобразователи используют двухмодовое ОВКД с волоконной решеткой, что обеспечивает связь между двумя модами. Период решетки  $\Lambda$  выбирается исходя из эффективной разности показателя преломления  $\delta n$  между двумя модами ( $\Lambda = \lambda / \delta n$ ). Типовое значение 100 нм. Такие решетки называются решетками с длинным периодом.

LP11 моде присуще поляризационная чувствительность и ее использование требует контроллеров поляризации перед каждым ОВКД данного типа. Эта проблема разрешается путем использования ОВ, генерирующих в несколько мод и применяющих моду LP02

LP01-----LPG-----LP02=2км-----LPG-----LP01

Модовые преобразователи имеют эффективность 99% в полосе C. Параметр хроматической дисперсии имеет величину  $-420 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$  около  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$  и эта величина меняется значительно с изменением длины волны. Устройства имеют низкие потери ( $< 3,7 \text{ дБ}$ ) и используются для компенсации дисперсии в C-диапазоне.

Для DWDM систем используются три типа волокон:

1. Одномодовые волокна с большой эффективной площадью поперечного сечения. Коммерческая версия имеет  $A_{\text{эфф}}$  на 30% больше, чем ОВ с ненулевой смещенной дисперсией (НСД):
2. ОВ с уменьшенным наклоном дисперсионных характеристик для ОВ с НСД
3. ОВ расширенного диапазона 1280-1625 нм (сухие ОВ).

Хроматическая дисперсия представляет небольшую проблему для скоростей передачи 2,5 Гбит/с даже через расстояние, превышающее 500 км. В 10 Гбит/с системах уже даже через 100 км требуется компенсация дисперсии. Для

компенсации дисперсии используются ОВ с отрицательной дисперсией и ОВ-брегговская решетка [3].

Волокно для компенсации дисперсии имеет длину в 4-5 раз большую для стандартного одномодового ОВ по рекомендации G-652. требуется 15км дисперсионного волокна, чтобы скомпенсировать 60 км стандартного волокна, при этом потери от включения дисперсионного волокна увеличиваются вдвое по сравнению со стандартным волокном. Спектральная зависимость стандартного волокна и дисперсионного волокна не точно скомпенсированы. Только одна длина волны может быть скомпенсирована точно.

Компенсаторы дисперсии должны иметь следующие характеристики:

- ограниченные настройки для магистральных линий и намного более широкие настройки для сети;
- низкие потери при включении;
- работа на нескольких длинах волн при низкой стоимости, ;
- одинаковые потери при включении при настройке дисперсионных характеристик;
- высокая надежность, легкая установка и работа и безопасная схема;
- легкая настройка при переходе на другой диапазон скоростей передачи.

Брегговская решетка может использоваться как отрицательный дисперсионный компенсатор.

В волоконно-оптических брегговских решетках спектральные части сигнала (длины волн) отражаются в разных точках ВОБР с линейно изменяющейся постоянной (чирпинговая ВОБР) и поэтому преодолевают оптический путь различной длины. Спектральные части на более коротких длинах волн отражаются позднее, чем части спектра на более длинных волнах. Вывод выходных сигналов осуществляется через оптический циркулятор, действующий как направленное трехпортовое устройство ввода-вывода.

ОВКД имеют большую отрицательную хроматическую дисперсию в диапазоне длин волн от 1525 до 1625 нм. Полная компенсация может быть достигнута, если абсолютные величины произведений "дисперсия \* длина световода" передающей линии и ОВКД одинаковые:

$$D_{SMF} \cdot L_{SMF} = |D_{DCF}| \cdot L_{DCF} \quad (3.33)$$

где  $D_{SMF}$  - хроматическая дисперсия передающего (одномодового)

световода

$L_{SMF}$  - Длина передающей линии

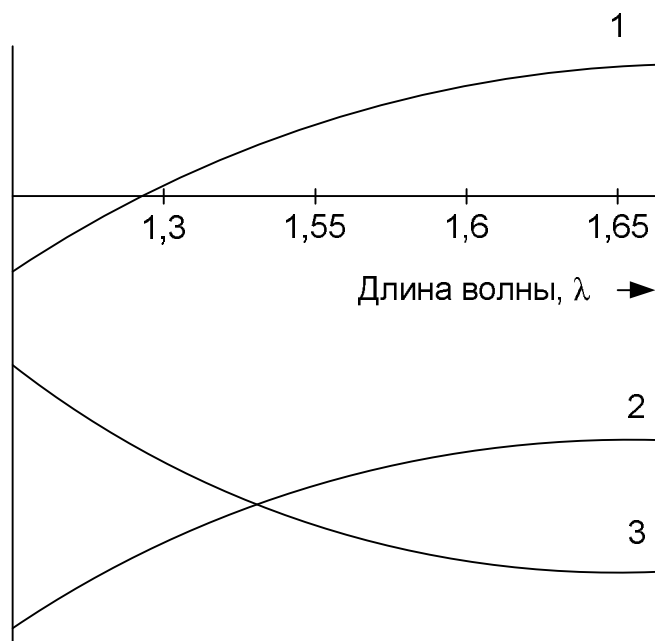
$D_{DCF}$  - хроматическая дисперсия оптического волокна для компенсации дисперсии

$L_{DCF}$  - длина оптического волокна для компенсации дисперсии.

Поскольку хроматическая дисперсия оптических волокон зависит от длины волны, то для эффективной работы широкополосных или многоканальных систем необходима так называемая компенсация крутизны наклона ее характеристики. Компенсация крутизны означает, что хроматическая дисперсия ОВКД не только имеет другой знак и значительно большую абсолютную величину, чем у передающего световода, но и другой знак и примерно такую же абсолютную величину его крутизны хроматической дисперсии (первая производная). На рис.14 показаны спектры хроматической дисперсии стандартного одномодового световода и соответствующих оптических волокон для компенсации дисперсии с компенсацией крутизны и без таковой.

Хотя вносимые потери ВОБР меньше, модули ОВКД более предпочтительны, так как их устойчивость к внешним воздействиям выше, они нечувствительны к температуре и имеют лучшую однородность по сравнению с ВОБР. Наибольшим преимуществом является использование ОВКД с компенсацией крутизны в широкополосных системах. Новейшими разработками в

этой области являются подстроечные или регулируемые МКД (модули компенсации дисперсии).



1. Стандартный одномодовый световод (ITU-T G.652) (МСЭ-T G.652)
2. Оптическое волокно для компенсации дисперсий для G.652
3. Оптическое волокно для компенсации дисперсии для G.652 с компенсацией крутизны

Рис.14 Схематическое изображение спектров хроматической дисперсии в качестве примера одномодовых световодов

При скоростях передачи 10-100 Гбит/с определяющим фактором при выборе длины РГУ является хроматическая дисперсия в одномодовых оптических волокнах.

1. Исходными данными при расчете являются данные по допустимому уширению гауссовского импульса для рассматриваемой скорости передачи [86], одномодового оптического волокна и формата модуляции. Эта форма имеет вид для уровня импульса 0,5:

$$0,425 \cdot T_{1/2} \cdot d = \sigma \quad (3.34)$$

где  $T_{1/2} = \frac{1,7d_m}{B}$ , пс

$B$  – скорость передачи, Гбит/с

$d_m$  - формат модуляции

$\sigma$  - допустимая норма по уширению гауссовского импульса, пс

При этом, определяем дисперсионную длину для данной системы передачи и применяемого формата модуляции:

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (3.35)$$

где  $\beta_2$  - дисперсия групповых скоростей, пс<sup>2</sup>/км

2. Определяем допустимую норму для приемника оптического сигнала в электрическом канале, исходя из отношения сигнал/шум и вероятности ошибки.

Согласно материалам МСЭ-Т [84], допустимая норма по вероятности ошибки в системе из конца в конец (в электрическом канале) должна быть равна не больше  $10^{-10}$ , что соответствует параметру  $Q_9$  - фактору в электрическом канале, равному 6,4.

Учитывая то, что мощность в электрическом канале  $P_{эл}$  равна:

$$P_{эл} = P_{оп}^2, \text{ где } P_{оп} - \text{мощность в оптическом канале}$$

то  $Q_o$  - фактор в оптическом канале будет равен  $\sqrt[4]{Q_9}$

Согласно [86] отношение сигнал/шум в оптическом или электрическом канале равно:

$$ОСШ_o = Q_o^2; \quad ОСШ_э = Q_9^2;$$

или

$$ОСШ_0 = 20\lg Q_0, \text{ дБ}; \quad ОСШ_9 = 20\lg Q_9, \text{ дБ}$$

3. Исходя из нормы на значение  $Q_9$  - фактора в электрическом канале, найдем допустимое значение в оптическом канале  $Q_0$ . Вместе с тем, можем принять, что в оптическом канале:

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l}} \quad (3.36)$$

где  $\beta_2$  - дисперсия групповых скоростей,  $nc^2/\text{км}$

$l$  – длина оптического волокна, км

где  $D$  – дисперсионный параметр,  $\frac{nc}{nm \cdot км}$

$\lambda$  - длина волны, мкм

$c$  – скорость света, км/с

4. Согласно [86], при распространении гауссовского импульса, он уширяется и сохраняет свою форму:

$$T_1 = T_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{l_d}\right)^2} \quad (3.37)$$

где  $T_1$  - полуширина гауссовского импульса на уровне  $1/e$  на длине  $l$ , пс

$T_0$  - полуширина гауссовского импульса на уровне  $1/e$  при  $l=0$  для рассматриваемой скорости передачи и применяемого формата модуляции;

Для формата модуляции NRZ и скорости передачи 10 Гбит/с;  $T_0=35,36$  пс

Вместе с тем:

$$T_0 \cdot d_m = \frac{T_6 \cdot d_m}{2\sqrt{2}} = \frac{T_{1/2} \cdot d_m}{1,665} \quad (3.38)$$

где  $T_{1/2}$  - полная ширина гауссовского импульса на уровне 0,5 его амплитуды, пс

$$\sigma = \frac{T_6 \cdot d_m}{4} = \frac{2,83 \cdot T_0 \cdot d_m}{4} = \frac{1,7 \cdot T_{1/2} \cdot d_m}{4} \quad (3.39)$$

5. Определяем допустимую длину, при которой потери мощности при уширении не будут превышать 1 дБ

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{l}{l_0}\right)^2} = 1,25. \text{ Потери по мощности будут равны } 10\lg \frac{T_1}{T_0} = 0,969\text{дБ}$$

При этом длина  $l = \frac{1}{2}l_0 = 28,8$  км. А при  $l = l_0 = 57,6$  км.  $Q_0 = \text{ОСШ} = 1,43$  или  $20\lg Q_0 = 3,1\text{дБ}$ . При этом потери мощности на дисперсию будут составлять 1,5 дБ. Максимально возможно допустимое значение потерь по мощности от дисперсии принято МСЭ-Т 2 дБ в этом случае:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1,6, \text{ при этом } \frac{l}{l_0} = 1,25, \text{ а при скорости } 10 \text{ Гбит/с и } \beta_2 = 21,7 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}, l = 44\text{км}$$

Примем  $l = 40\text{км}$ . В этом случае потери мощности сигнала от дисперсии будут

$$\text{составлять } \leq 2\text{дБ}, \text{ а } Q_0 = \frac{T_6}{2\sqrt{\beta_2 l}} = 1,697, \text{ ОСШ}_0 = 4,6\text{дБ}$$

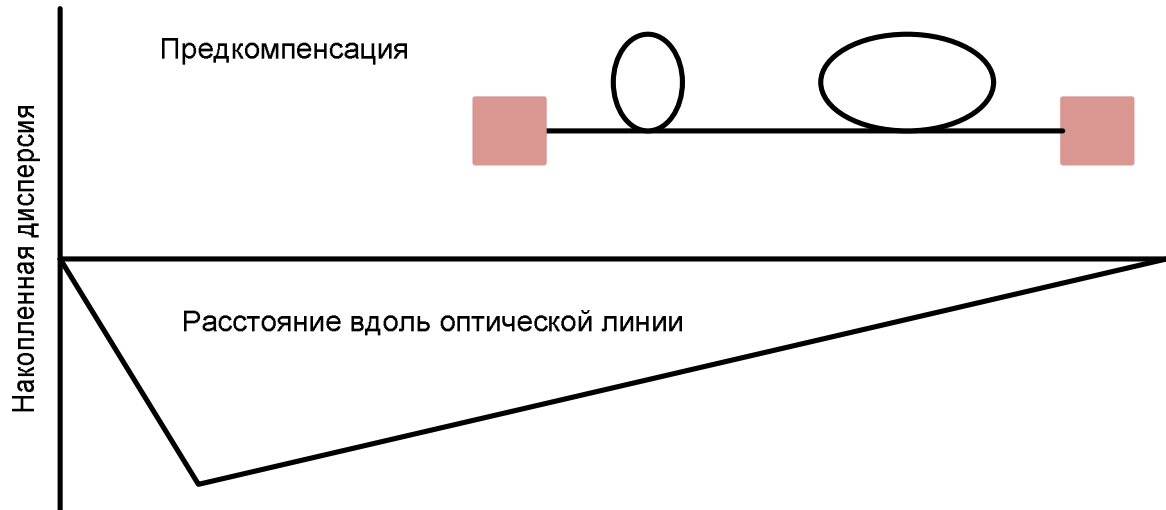
6. Определяем на этой длине ОВ затухание сигнала. Согласно МСЭ-Т [84], можно принять на длине 40 км и при коэффициенте затухания с учетом разъемных и неразъемных соединений равным 0,275 дБ/км,  $\alpha l = 11\text{дБ}$

7. При расчете в одном оптическом канале и одном регенерационном участке без промежуточных усилителей:

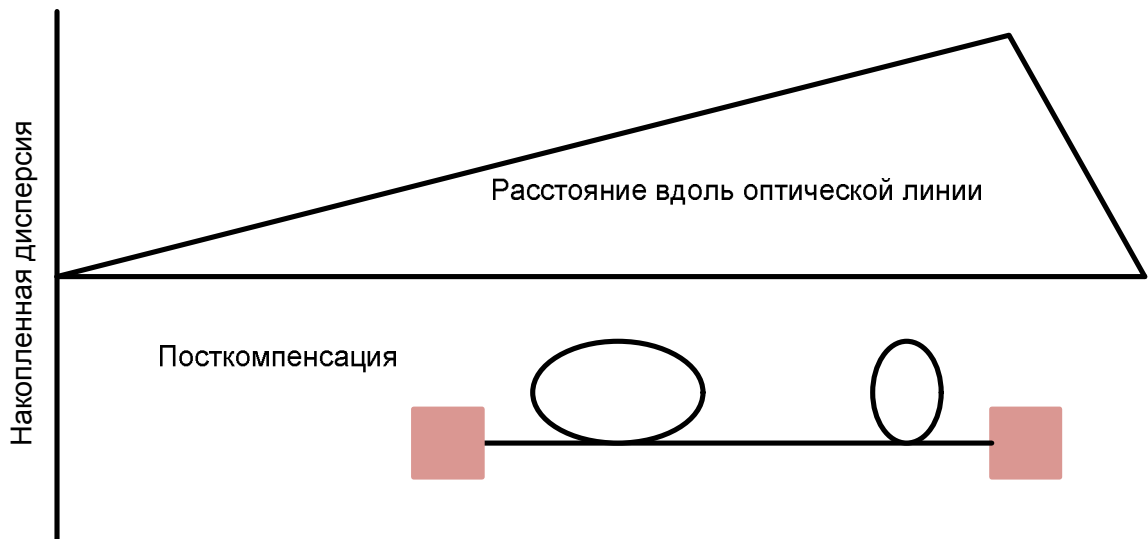
$\text{ОСШ}_9 = \alpha l + \text{ОСШ}_0 + a_d = 17,6$  дБ. Это значение определяет приемник на уровне вероятности ошибки  $10^{-10}$  и уровень сигнала передатчика, который должен обеспечить 17,6 дБ затухания в оптическом канале или увеличение чувствительности приемника при постоянном уровне передатчика.



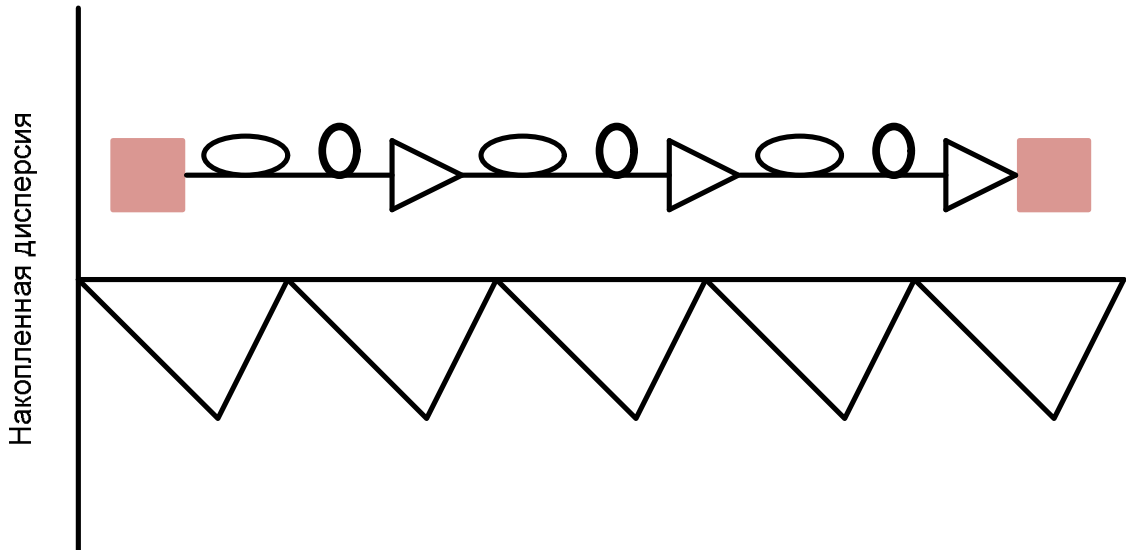
Приведенный алгоритм позволяет достаточно четко разобраться с решением влияния хроматической дисперсии на выбор длины регенерационного участка и определить требуемую характеристику вероятности ошибки с учетом формата модуляции для выбранной системы передачи на конкретном одномодовом оптическом волокне.



Предкомпенсация



Посткомпенсация



Периодическая дисперсионная карта

Рис.15 Схемы компенсации хроматической дисперсии

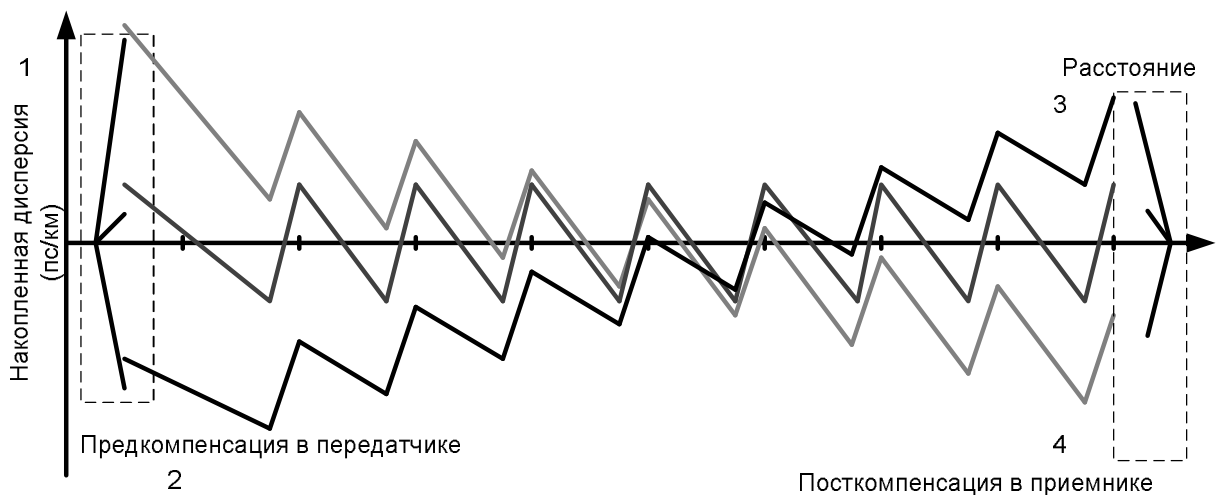


Рис.16 Схема накопления дисперсии вдоль всей передающей системы для различных длин волн в системах на основе волокна NZDSF (см. [35], © IEEE, 2006) : 1– накопленная дисперсия, пс/нм·км; 2 – предкомпенсация в передатчике; 3 – расстояние; 4 – посткомпенсация в приемнике

Как средство против большого размаха дисперсии при мультиплексной передаче была предложена новая комбинация волокна. Эта комбинация на каждом участке ретрансляции состоит из чередования двух типов волокон. Первый тип (+D) имеет положительную дисперсию ( $\sim +20$  пс/нм/км), большую эффективную

область ( $100 \text{ мм}^2$  или больше), низкое ослабление и положительный наклон дисперсии. Второй тип ( $-D$ ) имеет отрицательную дисперсию (приблизительно  $-40 \text{ пс/нм/км}$ ) и отрицательный наклон дисперсии, но более высокие потери ( $\sim 0,23 \text{ дБ/км}$  или больше) и эффективную область только  $\sim 30 \text{ мм}^2$  или меньше. Поскольку из малой эффективной области второй тип вызывает сравнительно больше искажений из-за нелинейных эффектов и пока располагается там, где оптическая мощность сравнительно меньше. Следовательно, такое волокно преимущественно вставляется в конце каждого участка ретрансляции. Типичная карта дисперсии с комбинацией волокон  $+D/-D$  изображена на рисунке 17:

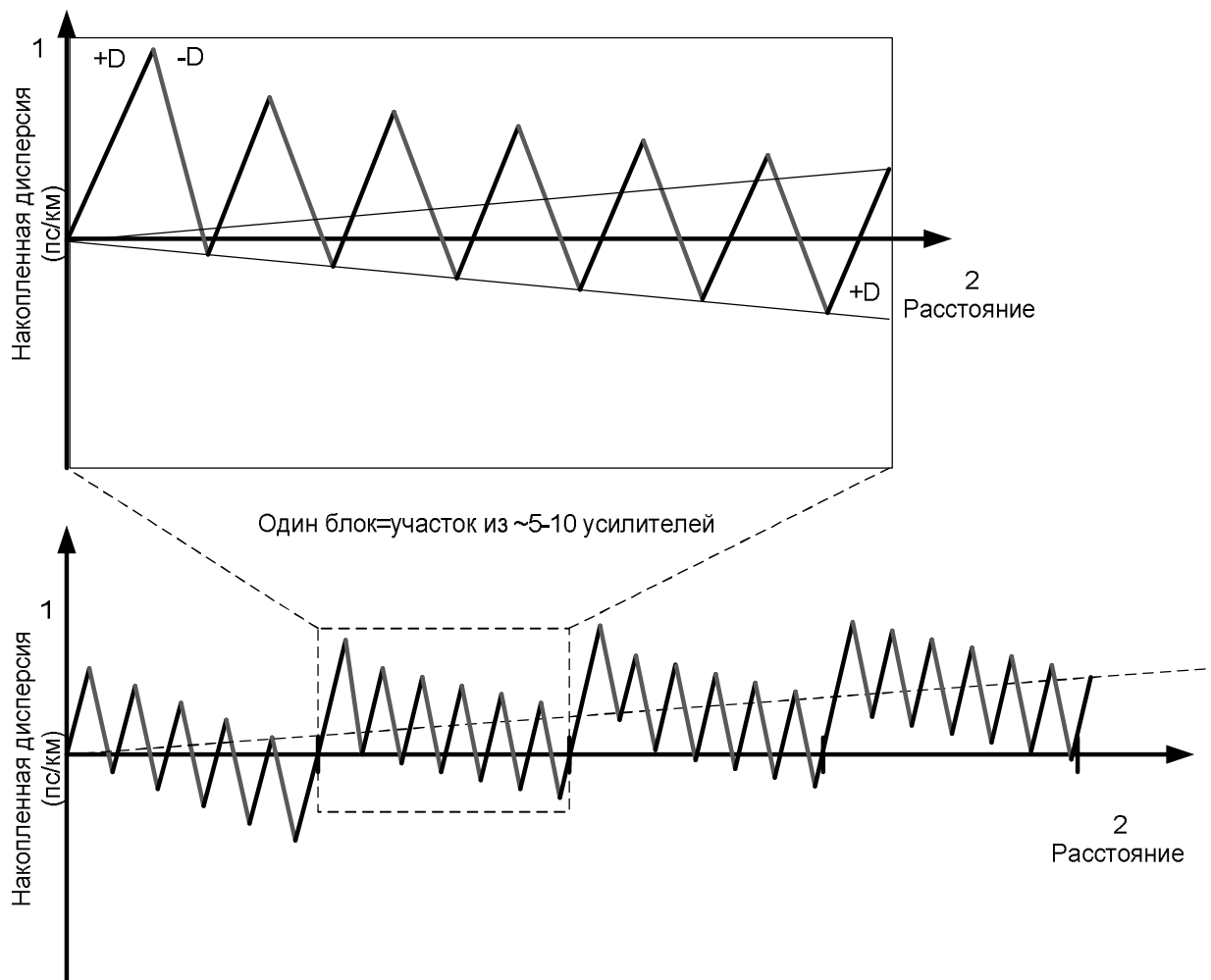


Рис. 17 Схема накопления дисперсии вдоль линии связи для систем на основе волокна  $+D/-D$  (см. [35], © IEEE, 2006) : 1– накопленная дисперсия, пс/нм·км; 2 — расстояние; 3 – один блок = участок из  $\sim 5-10$  усилителей

Как и выше, линия связи разделена на так называемые блоки. Они состоят из 5–10 участков ретрансляции. Хроматическая дисперсия преимущественно не компенсируется в конце каждого участка ретрансляции, таким образом, чтобы лучше противодействовать воздействию нелинейных ухудшений WDM (XPM и FWM) [2]. Наоборот, хроматическая дисперсия незначительно компенсируется в конце блоков.

Основное преимущество комбинации волокна  $+D/-D$  состоит в том, что профили показателей  $+D$  и  $-D$  разработаны таким образом, чтобы наклон дисперсии обоих волокон идеально совпадал. В результате изменение хроматической дисперсии по всем уплотненным каналам (как функция длины волны) очень мало на концах линии связи, что благоприятно сказывается на характеристиках после передачи по сравнению с системами NZDSF. Дополнительная стоимость, свойственная таким волокнам, в настоящее время ограничивает развертывание систем, основанных на волокнах  $+D/-D$  [37], но такие волокна могли бы подойти для широкополосных ( $> 25$  нм) и магистральных ( $> 9000$  км) систем.

В первых лабораторных экспериментах по передаче на канальной скорости 40 Гбит/с также использовали чередование волокон с компенсацией наклона и с положительной ( $+D$ ) и отрицательной ( $-D$ ) дисперсиями. Однако на такой более высокой скорости природа самых вредных нелинейных эффектов меняется. В частности, воздействие внутриканальных эффектов усиливается из-за наложения импульсов в волокне и, следовательно, увеличивается вследствие хроматической дисперсии.

Были созданы и успешно проверены в лабораториях конфигурации с тремя волокнами ( $+D/-D/+D$ ) на каждый участок ретрансляции и даже с восьмью волокнами на участок. Кроме того, были улучшены некоторые базовые характеристики волокна. За счет увеличения эффективной области волокна было уменьшено воздействие нелинейных эффектов, а снижение ослабления в волокне

привело к большему отношению оптического сигнала к шуму в конце линии. Это создало некоторый "запас" для проектировщиков системы, которые могут использовать такие волокна, чтобы предложить системы, рассчитанные на более длинные расстояния, или системы, имеющие меньшее число ретрансляторов. Было сообщение о впечатляющих особенностях волокне +D с эффективными областью  $200 \text{ мм}^2$  и потерями  $<0,16 \text{ дБ/км}$ . Однако это только обещания, это волокно еще не используется в системах и не изготовлено в достаточно больших объемах. С другой стороны, характеристики волокна –D были улучшены, и дальнейшие преимущества ожидаются в связи с недавними успехами в области технологии изготовления волокон с компенсацией дисперсии (DCF) в наземных сетях. Это может привести к увеличению эффективной области волокна –D и к сокращению его потерь. Любое такое улучшение характеристик передающего волокна, как ожидается, облегчит развертывание систем, работающих на канальной скорости 40 Гбит/с.

Хроматическая дисперсия характеризует скорость распространения света по волокну в зависимости от длины волны. Это означает, что различные длины волны распространяются по волокну с незначительно различающимися скоростями. Во временной области это означает, что оптические импульсы расширяются во время распространения. С одной стороны, этот эффект выгоден, поскольку волокно во время передачи проявляет нелинейные эффекты, которые зависят от пиковой мощности и уменьшаются, когда импульс расширяется. С другой стороны, хроматическую дисперсию нужно компенсировать, что обычно делается размещением в канале связи модулей компенсации дисперсии (DCM), которые восстанавливают начальную форму сигнала и обеспечивают обнаружение сигнала в приемнике. Основным параметром оптических систем передачи – допуск на хроматическую дисперсию, который равен количеству остаточной хроматической дисперсии, приводящей к потере чувствительности OSNR на 1 дБ, что, в свою очередь, сильно зависит от формата модуляции. Когда

скорость передачи битов удваивается, допуск на хроматическую дисперсию уменьшается в 4 раза.

Статическая компенсация дисперсии с помощью только DCM не достаточна для сверхдальней передачи на скоростях передачи битов выше 10 Гбит/с, поскольку дисперсия волокна в некоторой степени зависит от температуры. Для подземных линий связи это влияние незначительно, как как температурные колебания медленные и сравнительно малые. Но DCM, которые обычно располагаются на участках усилителя выше поверхности земли, особенно сильно могут подвергаться температурным изменениям в течение дня.

PMD в волокнах вызывается дефектами волокна, которые приводят к различной скорости распространения при различной поляризации. Поскольку PMD демонстрирует временное статистическое поведение, статическая схема компенсации не эффективна. Как эмпирическое правило считается, что дифференциальная групповая задержка, которая дает мгновенное значение PMD на определенной длине волны, на 30 % битового интервала приводит к потерям OSNR на 1 дБ. Для высокоскоростной сверхдлинной системы передачи необходима компенсация PMD.

Электронная компенсация искажений в высокоскоростных системах ETDM в настоящее время возможна только для скоростей передачи до 43 Гбит/с. Компенсаторы, которые были применены, являются электронным эквивалентом оптических эквалайзеров на основе PLC. Эти электронные трансверсальные фильтры имеют относительно простую структуру, а их применение для высокоскоростных систем передачи данных зависит от электрической полосы пропускания в этих каналах. Обещанные результаты применения линейных эквалайзеров для уменьшения искажения на скорости 43 Гбит/с были недавно опубликованы и показывают, что допуск дисперсии приемника может быть улучшен на 50 %, а допуск PMD – на 60 %.

Более высокое быстродействие электронных схем на основе SiGe также обеспечивает улучшение характеристик системы передачи на более низких скоростях. Для работы на скорости 10 Гбит/с были успешно реализованы два принципа. Первый – устройство оценки последовательности на основе максимального правдоподобия (MLSE), которое является цифровой схемой эквалайзера. Это устройство вычисляет наиболее вероятную последовательность символов, применяя алгоритм Витерби на основе гистограмм канала. Такой эквалайзер может компенсировать остаточную хроматическую дисперсию больше чем на 2000 пс/нм.

Дисперсию можно также компенсировать методом электронной предварительной компенсации. Этот подход основан на знании дисперсии канала и вычисляет форму сигнала, имеющего то же самое количество дисперсии с обратным знаком по отношению к передатчику. Этот сигнал преобразуется из цифровой в аналоговую форму и модулируется I/Q-модулятором.

### 3.3.2 Другие методы компенсации ХД

Для компенсации хроматической дисперсии используется большое число методов: электронные методы компенсации на передатчике, на приемнике, двухкаскадное усиление на линии с применением компенсирующих волокон, техника среднепролетной спектральной инверсии. Но наиболее распространенный метод – применение двухмодового оптического волокна и Брегговских решеток. Разработанная методика расчета компенсации хроматической дисперсии позволяет определить необходимую длину компенсирующего волокна в зависимости от его характеристик. Применение двухмодового оптического волокна не изменяет вводимую мощность сигнала и не вносит большого затухания, но требует преобразования мод из одномодового режима в двухмодовый. Применение настроенного высокоэффективного модового трансформатора с применением линзовых решений позволяет перейти от волны LP<sub>01</sub> к волне LP<sub>02</sub> и обратно после компенсации дисперсии. Данный модовый трансформатор работает как компенсатор и как стабилизатор по

выравниванию хроматической дисперсии и при этом исключается влияние поляризационной модовой дисперсии.

Хроматическая и поляризационная дисперсия являются ограничивающим фактором при передаче по оптическому волокну на дальние расстояния при высоких скоростях передачи 10-100 Гбит/с скорее, чем потери ОВ по затуханию. Дисперсия не только приводит к уширению передающего импульса, но и к дополнительным потерям. Оптические усилители не разрешают эту задачу, а в ряде случаев усугубляют усиливая уширяющий сигнал и внося дополнительные потери, как за счет хроматической (ХД), так и за счет поляризационной (ПМД) дисперсии. При малых скоростях передачи до 10 Гбит/с с поляризационной дисперсией считаются мало, все внимание уделяя хроматической дисперсии. Используются электронные методы компенсации ХД как на передатчике, так и на приемнике оптических сигналов. На линии используется двух каскадное усиление с применением оптических волокон для компенсации дисперсии (ОВКД). Наиболее распространенный метод-это применение двухмодовых ОВ и Бреговских решеток. Применяется так же техника среднепролетной спектральной инверсии, широкополосная компенсация дисперсии в ВОСП-СР для увеличения системной емкости.

Согласно [86] исходное уравнение для распространения импульса по ОВ записывается в виде:

$$\frac{\partial A}{\partial Z} + \frac{i}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial Z^2} - \frac{1}{\delta} \cdot \beta_3 \cdot \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0 \quad (3.40)$$

где А-амплитуда импульса

$\beta_3$ -третьего порядка дисперсии, описывающей наклон дисперсионной характеристики обычно не учитывают уже при  $|\beta_2| \geq 1$  пс<sup>2</sup>/км.

При  $\beta_3=0$ , решение уравнения представлено [86] в виде:



$$A(Z, t) = \frac{1}{2 \cdot U} \cdot \int_{-\infty}^U A(0, \omega) \cdot e\left(\frac{i}{2} \cdot \beta_2 \cdot Z \cdot \omega^2 - i \cdot \omega \cdot t\right) dU \quad (3.41)$$

$A(0, \omega)$ -преобразование Фурье  $A(0, t)$ .

Наводимая дисперсией деградация оптического сигнала создается фазовым фактором  $\exp(i \cdot \beta_2 \cdot Z \cdot \omega^2 / 2)$  создаваемым спектральными составляющими импульса при распространении по ОВ. Все решения на компенсацию ХД связаны с исключением того фактора.

Решения нашли применение на приемнике, передатчике, на ОВ. Электронные выравниватели разработаны для многочисленных применений однако, основная трудность заключается в том, что логические схемы должны работать на тех же скоростях, что и передаваемый сигнал.

Оптоэлектронная техника выравнивания базируется на специальных фильтрах которые, разделяют на приемнике сигнал по мощности на несколько сигналов, а волоконно-оптическая линия задержки вводит переменные задержки на разделенном сигнале. При этом используется несколько фотодетекторов с переменной чувствительностью. Суммарный фототок получается в требуемом виде. Следующим методом компенсации хроматической дисперсии является: техника chirпирования, различные форматы модуляции, кодирование сигнала.

Вместе с тем широко применяются ОВ для компенсации хроматической дисперсии (ОВКД).

Уравнение для компенсации с помощью ОВКД может быть записано:

$$A(L, t) = \frac{1}{2 \cdot U} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} A(0, \omega) \cdot \exp\left(\frac{i}{2} \cdot \omega^2 \cdot (\beta_{21} \cdot L_1 + \beta_{22} \cdot L_2) - i \cdot \omega \cdot t\right) du \quad (3.42)$$

где  $L = L_1 + L_2$ , а  $\beta_2$  и  $\beta_{22}$  - параметр дисперсии групповых скоростей на участках  $L_1$  и  $L_2$ .

Известно, что  $D = -\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \beta_2$ . В этом случае  $D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0$

$$L_2 = -\frac{D_1}{D_2} \cdot L_1 \text{ при } D_2 < 0, \text{ а } D_1 > 0$$

Необходимым условием должно быть:

$$L_2 \rightarrow 0 \text{ для ОВКД}$$

Достижение этого фактора зависит от нормированной частоты. Если для стандартного ОВ:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,405 \quad (2,0 < V < 2,405) \quad (3.43)$$

то для ОВКД:

$$V \approx 1 \text{ и } D \sim -100 \text{ пс/нм} \cdot \text{км}$$

1. Одномодовые ОВКД  $l=1$  км компенсируют только 10-12 км стандартного ОВ.
2. Затухание ОВКД равно  $\sim 0,5-0,6$  дБ/км.
3. Вследствие малого диаметра сердцевины, ограничена вводимая мощность в волокно, и проявляются нелинейные эффекты.

Решение этих проблем было найдено при применении двухмодового ОВКД ( $V \approx 2,5$ ). Затухание и вводимая мощность такие же как и у стандартного ОВ; 1 км данного ОВКД модуля компенсирует 40 км стандартного ОВ ( $D \sim -770$  нс/нм·км). Но ОВ требует применения устройства преобразования мод. В таких устройствах период Брегга  $\Lambda$  выбран на разнице модового индекса  $\delta n$  ( $\Lambda = \lambda / \delta n$ ). Типичное значение  $\sim 100$  мкм, несколько механизмов использовано: периодический стресс, микроизгиб, фоточувствительность. Потери от их включения ниже 1 дБ с эффективностью связи 99%.

Один из методов основан на настраиваемом высокоэффективном и селективном пространственном модовом трансформаторе для модулей

компенсации дисперсии, обеспечивая преимущество по компенсации дисперсии и наклона ее характеристик во всех применяемых оптических волокнах. При этом достигаются малые потери и высокая толерантность к нелинейным эффектам.

С помощью оптического трансформатора (ОТ) сигнал  $LP_{01}$  моды преобразуются в сигнал  $LP_{11}$  и обратно  $LP_{11}$  в  $LP_{01}$ . В этом случае используются ОВ с высоким двулучепреломлением, в котором межмодовая битовая длина:

$$L_b = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_{01} - \beta_{11}} \quad (3.44)$$

где  $\beta_{01}$  и  $\beta_{11}$  постоянные распространения  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  мод [8].

Вместо  $LP_{11}$  может быть использована мода  $LP_{02}$ .  $LP_{02}$  содержит:  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{12}$ ,  $LP_{03}$ . Две последние моды могут быть легко удалены с помощью микроизгиба, а  $LP_{11}$  и  $LP_{21}$  можно пренебречь. Используя устройство расширения луча удастся ввести световой сигнал с той же поляризацией в ОВКД, которое имеет достаточно большое двулучепреломление и с той же поляризацией вывести сигнал в исходное ОВ.

Волоконно-оптическая среда идеально подходит в жестких условиях, где определяющим условием являются электромагнитные помехи, пропускная способность, расстояния, размер и вес, суровые погодные условия и температура. Разработанные соединительные системы с расширением светового пучка в соединении в отличие от традиционных стыковых соединителей идеально подходят для самых критических условий соединения волоконно-оптических кабелей и устройств. Система в герметичном виде обеспечивает полную защиту от воды, грязи, пыли, масла и других загрязнений в любых полевых условиях. В сочетании с млн. внедренных волоконно-оптических разъемов типа MIL-HRE-29504, MIL-DTL-38999 представляет широкий спектр оптических разъемов с расширением луча. Эти запечатанные сборки идеально подходят для мониторинга окружающей среды. Это устройство позволяет использовать ОВ в С и L диапазонах.

Каждое устройство, используемое в схеме передачи светового сигнала, является источником вносимых потерь. Оно также будет источником отражений, обычно характеризуемых потерями на отражение. Эти потери обычно измеряются в децибелах. Несомненно, основной средой передачи сигналов является в настоящее время оптическое волокно, помещенное в различные кабельные конструкции.

Модовый трансформатор может работать как компенсатор дисперсии и как стабилизатор по выравниванию ХД и исключению ПМД. Максимальные потери от включения лежат в пределах 0,7-1,25 дБ. Отсутствует ПМД. Размеры устройства: цилиндр диаметром 1 см, а длина 6 см.

Так 100 км передающего ОВ LEAF в диапазоне 1529-1562 было скомпенсировано с остаточной ПМД=0,47 пс.

На рис. 18 представлена схема предложенного устройства с расширением луча. Данное устройство позволяет создать компенсатор дисперсии малых размеров с высокой эффективностью компенсации.

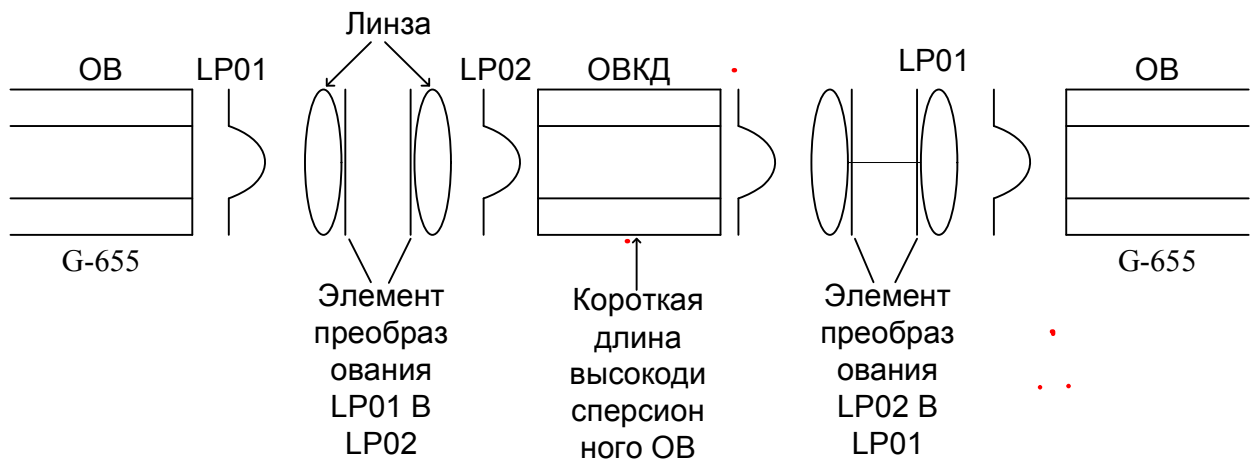


Рис.18 Схема преобразования  $LP_{01} \rightarrow LP_{02} \rightarrow LP_{02} \rightarrow LP_{01}$  с расширением луча.

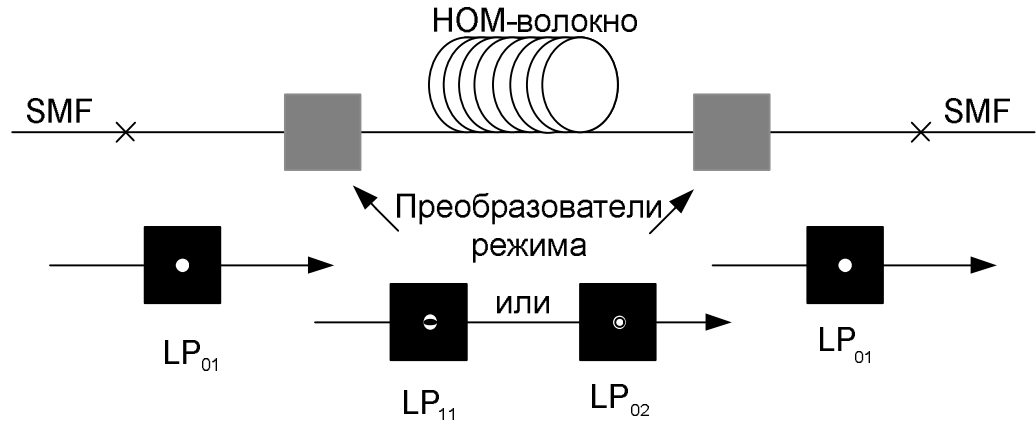


Рис. 19 Схема модуля компенсации дисперсии (НОМ-DCM). Фундаментальная мода  $LP_{01}$  подается на вход устройства, и ее же мы получаем на выходе. Преобразователи режима между  $LP_{02}$  и НОМ. Операция требует НОМ- волокно и преобразователь режима.

Штраф по мощности позволяет определить допустимую и дисперсионную длину при допустимых нормативах:

$$\text{Так, при штрафе в 2 дБ } \frac{T_1}{T_0} = 1,6$$

В этом случае  $\frac{\beta_2 z}{T_0^2} = 1,25$ , т.е.  $\frac{z}{l_D} = 1,25$  и параметр  $Q$  будет равен 3,7, что соответствует вероятности ошибки  $10^{-3}$ ,

где  $Q$ -фактор определяет отношение сигнал/шум в оптическом канале  $ООСШ = Q^2$  или  $ООСШ = 20 \lg Q$ .

$$\text{При } \frac{0,7T_0}{T_0} = \frac{K}{Q} \leq \frac{K_1}{Q_1}$$

Другими словами  $Q_1 < Q$ , т.е.  $Q$  должно быть не меньше  $Q=6,4$ , что определяет вероятность ошибки в оптическом канале не меньше  $10^{-10}$ .

Следовательно,  $Q > 6,4$ .

Это определяет те ограничения, которые предлагают авторы Агравал [8], и Фриман [45].

При этом, если учесть время нарастания передатчика и приемника  $\sim 10\%$  от общего времени нарастания передатчика, приемника и линии при  $K_1 = K$   $Q \geq 1,1Q$ . Следовательно,  $Q$  должно быть равно 7,0 в электрическом канале, а  $Q=6,4$

Модовый трансформатор эффективно работает в окнах С или L; при этом необходимо стремиться к минимуму потерь для моды LP02 и минимуму для других типов мод LPnm в высоко дисперсионном нелинейном оптическом волокне. Предполагается, что LP03 исключается путем создания петли ОВ, а при идеальных условиях влиянием мод LP11, LP21 можно пренебречь.

Таблица 3.14. Типовые характеристики модового трансформатора

Потери включения модового трансформатора лежат в диапазоне 0,7-1,25дБ	Моды	Затухание в полосе С, дБ лучшее	Типовое
Затухание обратного отражения: -28дБ	LP01	-26	-22
Отсутствует ПМД	LP11	<-30	-24
Совместимость с большой мощностью до 30дБм	LP21	<-35	<-30
Незначительное ПДЛ			
Размеры: диаметр-1см, длина 6см			

Однако, применение различных устройств для компенсации дисперсии, и в частности, поляризационной дисперсии все больше требует новых решений. При увеличении скорости передачи выше 10 Гбит/с кроме хроматической дисперсии начинает интенсивно влиять поляризационная модовая дисперсия (ПМД). Особенно это сильно сказывается на стандартном оптическом волокне (ОВ) и на уже установленных оптических волокнах, у которых ПМД параметр в 100-1000 раз больше, чем у самых современных ОВ. Поэтому, целесообразно использовать современные разработки для подавления влияния ПМД на передачу в

установленных ОВ. Динамическая компенсация ПМД базируется на следующем принципе: включение линии задержки одной из компонент поляризации фундаментальной моды  $LP_{01}$ . Одно из достижений оптической компенсации ПМД, базируется на оптике в свободном пространстве. Однако этот метод имеет большое число трудностей, связанных с отражением и выравниванием. Другой метод основан на температурной настройке малых длин ОВ с большим двулучепреломлением. Третий метод основан на применении брегговских решеток. Наиболее эффективным является метод, основанный на оптической линии задержки между ортогонально поляризованными модами в динамическом компенсаторе ПМД, которая может настраиваться в широком диапазоне длин волн.

В данном решении брегговская решетка реализована в ОВ с большим двулучепреломлением. В этом ОВ компоненты моды  $LP_{01}$  по осям  $x$  и  $y$  имеют различные показатели преломления. В общем виде отражение на максимальной длине волны брегговской решетки записывается:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{эфф}} \cdot \Lambda \quad (3.45)$$

где  $n_{\text{эфф}}$  – эффективный показатель преломления ОВ,  $\Lambda$  - период индекса модуляции брегговской решетки.

Однако, из-за различия показателя преломления в двулучепреломляемом ОВ, брегговская решетка будет отражать две различные длины волны на ортогональных поляризациях. Разница между двумя длинами волн ( $\Delta\lambda_{\text{ОВ}}$ ) зависит от двулучепреломления ОВ ( $B$ ) и записывается как:

$$\Delta\lambda_{\text{ДОВ}} = 2 \cdot B \cdot \Lambda \quad (3.46)$$

В брегговской решетке, записанной в ОВ с большим двулучепреломлением (СДОВ) каждая позиция решетки будет отражать две длины волны на ортогональных поляризациях. Это означает, что групповая задержка есть комбинация двух линейных функций, одна для каждой поляризации, с одним и тем же наклоном ( $D_6$ ) и смещением  $\Delta\lambda_{\text{СДОВ}}$ .

$$\tau_y(\lambda) = D_6 \cdot \lambda + a \quad (3.47)$$

$$\tau_x(\lambda) = D_6 \cdot (\lambda - \Delta\lambda_{\text{сДОВ}}) + a \quad (3.48)$$

Где  $a$  – постоянная величина,  $y$  – поляризация – быстрая ось ДОВ,  $x$  – поляризация – медленная ось ДОВ.

Кроме того, относительная групповая задержка, наводимая в брегговской решетке, записанной в ДОВ ( $\Delta\lambda = \tau_m - \tau_y$ ):

$$\Delta\tau = -D_6 \cdot \Delta\lambda_{\text{ДОВ}} \approx -2 \cdot D_6 \cdot D \cdot \Lambda \quad (3.49)$$

Брегговская решетка с наводим тепловым полем будет иметь дисперсию:

$$D_6 \approx \frac{2 \cdot L \cdot n_{\text{эфф}}}{c \cdot S \cdot \Delta T}, \Delta T \neq 0 \quad (3.50)$$

Где  $L$  – длина решетки,  $c$  – скорость света,  $S$  – температурная чувствительность ОВ.

$S=13,7$   $\text{рм}^\circ\text{С}$  для решетки, записанной на  $\lambda=1550$  нм в кварцевом ОВ с примесью  $\text{GeO}_2$  в сердцевине.

Полученные решения позволяют использовать соединитель с расширением светового пучка для компенсации хроматической и поляризационной дисперсий.

Полученные результаты позволяют определить допустимые длины регенерационного или усилительного участков с учетом нормативных значений вероятности ошибки на основании определения Q-фактора, который определяет отношение сигнал/шум в оптическом канале.



### Выводы по третьей главе:

1. Учитывая влияние ПМД на задержку сигнала и хроматическую дисперсию, были разработаны современные оптические волокна с малым значением ПМД  $< 0,2$  пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .
2. Дисперсионная длина, определяемая в [1] и в диссертации Зелюткова Е.А.[91], должна уменьшиться и, следовательно, для компенсации хроматической дисперсии потребуются большие длины компенсирующего волокна, чем при расчетах дисперсионной длины без учета поляризационной модовой дисперсии.
3. Эти утверждения сказываются при больших скоростях передачи от 40 Гбит/с и при больших длинах усилительных участков от 60-100 км.
4. При скоростях передачи 40-100 Гбит/с следует ориентироваться на оптические волокна G-655 по рекомендации Международного союза электросвязи по телекоммуникациям (МСЭ-Т), так как они обладают меньшим значением хроматической дисперсии, а связь между хроматической дисперсией и ПМД описывается выражением  $\text{ПМД} = x \cdot \sqrt{D}$  или  $\text{ПМД} = x_1 \cdot \sqrt{\beta_2}$

X / ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$	D пс/нм·км
0,3 / 1,3	18
0,1 / 0,24	6,0
0,05 / 0,01	3,0

## **Глава 4. Алгоритмическая методика определения хроматической и поляризационной модовой дисперсии и методика экспериментального подтверждения**

### **4.1. Алгоритм решения по выбору длины усилительного участка с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсий, методов модуляции, предварительной коррекции ошибок и методов кодирования.**

При скоростях передачи 10-100 Гбит/с необходимым условием является предварительная оценка требуемого значения отношения сигнал/шум, при выбранной длине усилительного участка и необходимого числа усилительных пунктов, наличие усилителей мощности, компенсаторов хроматической дисперсии и предусилителей. Все эти элементы вместе с другими элементами, кроме изоляторов, фильтров и т.д., оптического волокна, также оказывают влияние на значение поляризационной дисперсии волоконной линии связи. Определение предварительного значения при выбранном числе усилительных участков отношения сигнал/шум позволяет оценить необходимость решения по компенсации хроматической дисперсии.

Использование предварительной коррекции ошибки позволяет снизить значение отношения сигнал/шум на 6 дБ. Решение для длины усилительного участка по затуханию для данной скорости передачи позволяет решить задачу по компенсации хроматической дисперсии (с учетом хроматической дисперсии высшего порядка). При учете элементов и их количества, поляризационной дисперсии оптического волокна, определяем значение поляризационной модовой дисперсии на линии. Зная его возможное превышение относительно существующих норм, можно уменьшить длину усилительного участка за счет поляризационной модовой дисперсии или применить поляризационные компенсаторы дисперсии. Это позволяет уменьшить влияние ПМД на ВОЛС.

1. Исходным положением при разработке алгоритмической методики является, длина магистрали P2P, тип ОВ, число оптических усилителей и длина усилительного или регенерационного участка, выбранная по затуханию сигнала на рассматриваемой скорости передачи (10 Гбит/с и выше). При этом

необходимым условием являются требования к отношению сигнал/шум для рассматриваемой скорости передачи с учетом коэффициента битовой ошибки не больше  $10^{-9}$ .

Требования приводятся в таблице 4.1:

Таблица 4.1 Требования к Q-фактору

В Гбит/с	Отношение сигнал/шум требуемое (BER= $10^{-9}$ дБ)	Q <sub>9</sub>	Q <sub>0</sub>
10	18	8	1,68
40	24	16	2,0
100	28	26	2,26
160	30	32	2,38
400	34	52	2,685

2. Зная длину линии, систему передачи, тип ОВ, его характеристики, определим длину усилительного или регенерационного участка по затуханию:

$$l_{\alpha} = \frac{A}{\alpha} = \frac{p_{пер.} - p_{приемн.}}{\alpha}, км \quad (4.1)$$

$$l_{\alpha} = \frac{\mathcal{E} - A_n - 2 \cdot A_p - \mathcal{E}_{зем}}{\alpha_{ов} + \frac{A_n}{l_{стр.д.}}}, км \quad (4.2)$$

$\mathcal{E}$  – энергетический потенциал системы;

$A_n$  – затухание неразъемных соединений;

$A_p$  – затухание разъемных соединений;

$$\mathcal{E}_{запас} = A_t + A_{время} + A_0, дБ \quad (4.3)$$

$A_t$  – изменение за счет температуры;

$A_{время}$  – изменения за счет старения и ремонта аппаратуры;

$A_d$  – потери за чет хроматической и поляризационной модовой дисперсии;

Энергетический потенциал системы приведен в таблице 4.2 [91].

Таблица 4.2. Энергетический потенциал систем передачи.

Система передачи	Э, дБ	Уровни	
		Передача, дБм	Прием, дБм
STM - 1	35	-34	-33
STM - 4	29	-28	-27
STM - 16	23	-24,5	-26
STM - 64	17	-21	-16,3
STM - 256	11	-18	-13
STM - 640	15		

Зная требования по хроматической дисперсии определим допустимую длину при потерях на дисперсию в пределах 1,5 дБ:

$$l_d = \frac{T_b^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta_2|}, \text{ км} \quad (4.4)$$

где  $T_b$  - битовый период для формата модуляции NRZ, который учитывается в модуляционном параметре  $d_m=1$ . При других форматах модуляции:

RZ05  $d_m=0,5$

RZ033  $d_m=0,33$

RZ066  $d_m=0,66$

$\beta_2$  – дисперсия групповых скоростей,  $\text{пс}^2/\text{км}$ .

$l_d$  – может быть определена другим путем:

$$l_d = \frac{T_b \cdot d_m}{4 \cdot D \cdot \Delta\lambda}, \text{ км} \quad (4.5)$$

где  $D$  – параметр хроматической дисперсии,  $\text{пс}/\text{нм}\cdot\text{км}$ , связан  $\beta_2$ .  $\Delta\lambda$  - среднеквадратичная ширина полосы источника излучения, нм (0,1-0,4 нм).

В обоих случаях не учитываются влияния поляризационной модовой дисперсии (ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ). Вместе с тем, значение ПМД и допустимая длина, при которой потери не превышают 1 дБ, описывается выражением:

$$l_{\text{пмд}} = \left( \frac{0,1 \cdot T_6}{\text{ПМД}} \right)^2 \quad (4.6)$$

где ПМД – коэффициент ПМД, пс/ $\sqrt{\text{км}}$ . Для ОВ он задается в характеристиках.

Однако, при длине линии, превышающей усилительный участок  $l_\alpha$  в несколько раз, следует учитывать наличие усилительных элементов на линии, а при  $l_\alpha > l_d$  следует учитывать и наличие элементов для компенсации дисперсии.

В результате  $\text{ПМД}_{\text{ов}} < \text{ПМД}_d$  для рассматриваемой системы передачи. Расчеты, приведенные в [11], приведены в таблице 4.3.

Потери мощности при раскрытии глаз-диаграммы при формате модуляции NRZ определяется выражением (за счет дифференциальной групповой задержки):

$$P = 1 \text{ дБ} = 15 \cdot (\text{ДГЗ} \cdot B)^2, \text{ дБ} \quad (4.7)$$

При потерях в 1 дБ  $\text{ДГЗ}(\text{max}) = 0,26/B = 0,26 \cdot T_6$ . В этом случае система отказывает. Вероятность отказа  $10^{-6}$  – (30 с в год) это составляет 0,33 ДГЗ(max). Учитывая эти решения, можно определить требования к ПМД оптических волокон для телекоммуникационных приложений (таблица 4.3):

Таблица 4.3. Требования к ПМД.

В, Гбит/с	Формат модуляции	ДГЗ(max), пс	ПМД системы, пс	ПМД ОВ, пс	L системы, км	КПМД, пс/ $\sqrt{\text{км}}$
10	NRZ	26	7,5	5,3	100	0,53
10	NRZ	26	7,5	5,3	4000	0,08
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	100	0,13
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	2000	0,03
40	RZ	9,1	2,6	1,9	2000	0,04

40	RZ	4,6	1,3	0,9	1000	0,03
----	----	-----	-----	-----	------	------

Расчеты, выполненные по полученным выражениям данного алгоритма показали отличие коэффициентов ПМД ОВ и коэффициентов ПМД системы в  $\sqrt{2}$  раз.

Определение с элементарного кабельного участка, учитывая его разные длины, ориентируясь на решение МСЭ. Необходимо определить значение ПМД<sub>Q</sub> исходя из количества строительных длин:

$$\text{ПМД}_{Q \text{ э.у.}} = \sqrt{\frac{\text{ПМД}_1^2 \cdot l_1 + \text{ПМД}_2^2 \cdot l_2 + \dots + \text{ПМД}_n^2 \cdot l_n}{l}}, \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}} \quad (4.8)$$

где  $l_1, l_2, \dots, l_n$  – строительные длины кабеля на элементарном кабельном участке, км

$l$  – длина элементарного кабельного участка, км.

Вместе с тем, элементарным кабельным участком может быть и линия без промежуточных усилителей и компенсаторов хроматической дисперсии длиной 40-100 км. Даже в этом случае суммирование со значением хроматической дисперсии не дает никакой прибавки и не дает возможности правильно оценить воздействие поляризационной дисперсии на передачу. Согласно МСЭ-T (документ G-691) полной дисперсии отводится значение с учетом системы передачи, равное  $0,3T$ , где  $T$  – битовый период, причем на хроматическую дисперсию кабеля отводится  $0,25T$ , а на дисперсию ПМД отводится  $0,1T$  системы из конца в конец с учетом промежуточных усилителей, компенсаторов и других элементов, при этом учитывается фактор распределения Максвеллиана, равный 3. Функциональные требования для работы системы определяются с учетом ПМД волокно/кабель на основании выражения:

$$\text{ПМД}_{\text{системы}} = \sqrt{\frac{\text{ПМД}_Q^2 \cdot l_1 + n_1 \cdot \text{ПМД}_y^2 + n_3 \cdot \text{ПМД}_K^2}{l}} \quad (4.9)$$

где  $l_1 < l$ ,  $l_1$  – длина кабеля,

$l = l_1 + n \cdot l_K$  - общая длина линии с учетом компенсаторов дисперсии.

При  $l_\alpha > l_d \leq l_{\text{ПМД}}$  следует учитывать и хроматическую и поляризационную модовую дисперсию, а при  $l_d \leq l_{\text{ПМД}}$  ПМД будет играть .... роль в передаче сигналов.

Следующим шагом является определение отношения сигнал/шум для данной линии и системы передачи.

Типовое значение ООСШ требуемое для различных скоростей передачи при прямом детектировании при  $10^{-9}$  коэффициенте битовых ошибок приведено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Типовое значение ООСШ для различных скоростей передачи.

Скорость передачи, Гбит/с	2,5	10	40	100
Qэ, треб., дБ	12	18	24	28
Qо , треб	1,414	1,68	2	2,26
Qэ, треб при КБО= $10^{-3}$	4	8	16	26

Для скорости передачи 40 Гбит/с ООСШ требуется равным 24 дБ. При 18 дБ потерь на пролет при 5 дБ на шум усилителя  $P_k=0$  дБм при ООСШ= $10^{-9}$  допускается 5-6 промежуточных оптических усилителей.

Эмпирическое выражение для ООСШ представлено для длины волны 1550 нм следующим выражением:

$$\text{ООСШ(дБ)} = 58 - 10 \cdot \lg N - N \cdot F - 10 \cdot \lg L + P_{\text{вых}} - 10 \cdot \lg M - K \quad (4.10)$$

M-число каналов, N-число усилителей, L- потери на один пролет, NF-шум усилителя,  $P_{\text{вых}}$ -выходная мощность усилителя, K – другие факторы.

Требуемая величина оптического отношения сигнал/шум составляет 18 дБ при формате модуляции «включено-выключено» при коэффициенте битовых ошибок (КБО)  $10^{-9}$  при скорости передачи (В) 10 Гбит/с [3, 4]. При увеличении битовой скорости в четыре раза при том же значении коэффициента битовых ошибок требуемая величина отношения сигнал/шум (Qэ) должна увеличиться на 6 дБ, т.е. до 24 дБ.

В таблице 4.4 приведены значения коэффициента битовых ошибок (BER) для различных скоростей передачи с учетом предварительной коррекции ошибок.

Для преодоления негативных воздействий на ООСШ используется предварительная коррекция ошибок (ПКО); для уменьшения влияния ПМД выбирается формат модуляции (RZ-DPSK), для преодоления воздействия хроматической дисперсии используются компенсирующие ОВ или электронная компенсация; нелинейность корректируется с помощью формата модуляции.

Применяя упреждающую коррекцию ошибки третьего поколения (блок турбокодов) можно получить 10 дБ и 12 дБ на отрицательное кодирование усиления (таблица 4.5):

Таблица 4.5 Предварительная коррекция ошибки.

Поколение ПКО	Коды	Степень кодирования	Qэ, дБ	BER	BER на приеме
Первое	Рид-Соломон	0,93	11,5	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-13}$
Второе	Последовательные Рид-Соломон	0,93-0,79	9,0	$5 \cdot 10^{-3}$	- «-
Третье	Турбо коды	Меньше 0,8	6,2	$2,3 \cdot 10^{-2}$	- «-
Предел	Шеннона	0,7	5,4	$2,0 \cdot 10^{-2}$	



Для одного пролета и одного канала данное эмпирическое выражение будет иметь вид для длины волны 1550 нм с учетом первого поколения предварительной коррекции ошибки:

$$ОСШ - 6 \text{ дБ} = 58 + P_{\text{вх}} - \alpha L - NF - k \quad (4.11)$$

Примем  $P_{\text{вх}} = 0 \text{ дБм}$ ,  $k = 6 \text{ дБ}$ ,  $NF = 5 \text{ дБ}$ .

Результаты расчета для различных скоростей передачи приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Расчет коэффициента затухания для различных скоростей передачи

В, Гбит/с	2.5	10	40	100	160	400	
$\alpha L$ , дБ / L, км	41/149	35/127	29/105	25/90	23/83	15/54	КБО10 <sup>-3</sup>

Если принять коэффициент затухания 0,275 дБ/км, то с учетом применения компенсации дисперсии длина пролета лежит в пределах 50-150 км в зависимости от типа ОВ и системы передачи.

Определим для стандартного оптического волокна G-652 и оптического волокна G-655 допустимые длины по дисперсии при скоростях передачи 10, 40, 100 Гбит/с, и при величинах групповых скоростей для ОВ G-652 - 22,4 пс<sup>2</sup>/км ( $D=18 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$ ), а для ОВ G-655 - 5 пс<sup>2</sup>/км ( $D=4 \text{ пс/нм}\cdot\text{км}$ ) на длине волны 1550 нм без учета поляризационной модовой дисперсии. Результаты расчета приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 Допустимые длины по хроматической дисперсии для различных скоростей передачи и форматов модуляции.

Тип ОВ	10 Гбит/с	10 Гбит/с	40 Гбит/с	40 Гбит/с	100 Гбит/с	100 Гбит/с
	NRZ	RZ05	NRZ	RZ05	NRZ	RZ05
	Lд, км   0,7 5Lд, км	Lд, км / 0,7 5Lд, км	Lд, км / Lд, км м	Lд, км / Lд, км д, км	Lд, км / Lд, км км	Lд, км / Lд, км км

G-652	55,8/41,9	14/10,5	3,5/2,6	0,9/0,65	0,56/0,42	0,14/0,1
G-655	250/187,5	62,5/46,9	15,6/11,7	3,9/2,9	2,5/1,9	0,625/0,47

Во всех рассмотренных расчетах Qэ-фактор будет равен 6,1, что соответствует вероятности ошибки  $10^{-9}$ . При средней постоянной оптической мощности сигнала оптический импульс при формате модуляции RZ05 будет иметь удвоенную пиковую мощность по сравнению с форматом модуляции NRZ. Увеличение мощности возникает вследствие того, что оптические усилители входят в режим насыщения; в результате усиление будет соизмеримо со средней входной мощностью, а фототок фотодетектора пропорционален оптической мощности. Поэтому принимаемая электрическая мощность пропорциональна квадрату оптической мощности.

Так, если принять среднюю оптическую мощность формата модуляции NRZ равной P при передаче «1», то при передаче «1» RZ50% мощность будет 2P, то есть на 3 дБ больше (в 2 раза). Вместе с тем происходит повышение электрической энергии на бит и дробовый шум приемника также увеличивается для импульса с большой амплитудой. Это уменьшает эффект преимущества до 2,5 дБ (1,78 раз). Другими словами, если при использовании формата модуляции RZ50% уменьшаем расстояние между усилителями за счет хроматической дисперсии в 4 раза по сравнению с форматом модуляции NRZ, то по мощности мы увеличиваем это расстояние в 1,78 раз. Если принять затухание оптического волокна с учетом неразъемных соединений, равным 0,275 дБ/км, то увеличение длины будет равно 9 км для формата модуляции RZ50% по сравнению с форматом модуляции NRZ. Ясно, что данные рассуждения могут быть применимы при скоростях передачи 10-100 Гбит/с. Как увеличить расстояние между усилителями без компенсирующих элементов на линии:

-замена оптического волокна G-652 на ОВ G-655 и при скорости передачи 10 Гбит/с, принять расстояние между усилителями при формате модуляции NRZ равным дисперсионной длине. Однако, при переходе на скорость передачи 40 Гбит/с при тех же равных условиях следует применить упреждающую коррекцию ошибки. Из таблицы видно, что длина усилительного участка по хроматической дисперсии для ОВ G-655 для скорости передачи 40 Гбит/с для формата модуляции NRZ больше в 4 раза, чем для формата модуляции RZ50% и равно всего 13 км. Используем 1-е поколение упреждающей коррекции ошибки: код Рида-Соломона имеет избыточность 6,7% ( $(255-239)/239 = 6,7\%$ ) Это позволяет использовать вероятность ошибки при  $BER 1e-12$   $Q_{\text{э}} = 11,5 \text{ дБ}$ , т.е.  $Q_{\text{э}} = 3,6$ , что соответствует коэффициенту вероятности битовой ошибки  $1,8 \cdot 1e-4$ . В результате получим увеличение длины по дисперсии для формата модуляции NRZ до 14,4 км:

$$L = \frac{T_0^2 \cdot d_M^2}{4,32 \cdot Q_0^2 \cdot |\beta_2|} = 14,4 \text{ км}$$

При использовании второго поколения упреждающей коррекции ошибки при избыточности 11,1% и полученной вероятности ошибки  $2.1e-2$  ( $(239-229)/229 + 255-239/239$ ) =  $0,04367 + 0,06694 = 11,1\%$ ,  $Q_{\text{э}} = 2.65$ . В этом случае для формата модуляции NRZ при скорости передачи 40 Гбит/с для ОВ G-655 получим расстояние по хроматической дисперсии, равное 15,5 км. При отрицательном кодировании усиления, при этом, получим 11 дБ, т.е. увеличение расстояния по затуханию на 40 км.

При третьем поколении упреждающей коррекции ошибки получаем избыточность 23,6%,  $Q_{\text{э}} = 2.05$

и увеличение длины по хроматической дисперсии, равное 14,3 км

В результате допускается уширение передаваемого импульса при первом поколении упреждающей коррекции ошибки:

$$\frac{T_1}{T_6} = \sqrt{1 + \frac{3,42}{Q_3}} = 1,453, \text{ т.е. можно допустить уширение импульса, равное}$$

1,4 вместо 1,25 и допустимые потери вырастут до 1,45 дБ вместо 1 дБ.

При втором поколении упреждающей коррекции ошибки уже

$T_1/T_6 = 1,584$ , т.е. допустимые потери вырастут до 2 дБ.

При третьем поколении упреждающей коррекции ошибки:

$T_1/T_6 = 1,72$  т.е. допустимые потери вырастут до 2,35 дБ.

Во всех трех случаях отрицательное кодирование усиления позволяет увеличить длину элементарного кабельного участка свыше 40 км. Избыточность определяет процент увеличения длины элементарного кабельного участка по затуханию.

Известно, что при скоростях 10-100 Гбит/с существующая поляризационная модовая дисперсия приобретает существенное значения, оказывая влияние на длину ЭКУ вследствие увеличения уширения передаваемого импульса. В первую очередь уменьшается дисперсионная длина и уменьшается общая длина линии. В таблице 3 приведены типовые значения параметров ПМД для оптического волокна баз компенсации дисперсии при норме на ПМД  $0,1T_6$ .

Таблица 4.8. ПМД, скорость и длина линии

Скорость, Гбит/с	0,5 пс/√км	0,1 пс/√км
10	400 км	10000 км
40	25 км	625 км
100	4 км	100 км

При применении различных форматов модуляции и упреждающей коррекции ошибки необходимо учитывать влияние ПМД на дисперсионную длину и  $S$  следовательно, на длину компенсирующих оптических волокон.

Выбрав длину магистрали, определившись с длиной усилительного участка на выбранном типе оптического волокна, в дальнейшей разработке методики используются 3 важных элемента:

- дисперсионная длина и допустимая длина;
- допуск на потери по хроматической и поляризационной модой дисперсии;
- отношение сигнал/шум системы передачи;

### Первый этап.

$$L_d = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (4.12)$$

При допуске потерь 1 дБ на хроматическую дисперсию допустимая длина составляет:

$$L_{\text{доп}} = 0,75 \cdot L_d \quad (4.13)$$

а при потерях 2 дБ:

$$L_{\text{доп}} = 1,25 \cdot L_d \quad (4.14)$$

В этом случае:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{L_{\text{доп}}}{L_d}\right)^2} \rightarrow 10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_0} \quad (4.15)$$

$$а Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_M}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2|} \cdot l_{\text{доп}}} \rightarrow Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_M}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2|} \cdot l_\alpha} \quad (4.16)$$

где  $l_\alpha$  выбранная длина усилительного участка по затуханию.

При применении формата модуляции RZ и квадратурнофазовой манипуляции, не происходит изменения дисперсионной длины.

$$RZ05 \cdot 3,33 \cdot \lg(M = 4) = 1 \quad (4.17)$$

Но так как RZ наиболее защищена от влияния ПМД выбирается:

$$RZ \cdot 3,33 \cdot \lg M = 4 \quad (4.18)$$

### Второй этап.

Второй этап учитывает применение FEC (упреждающей коррекции ошибки)  
 $Q_{ЭFEC} = 8$ ;  $Q_{Э} = 16$  при 40 Гбит/с.

$$L_{д1} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{Э}}{Q_{ЭFEC}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (4.19)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,75 \cdot L_{д1}}{L_{д1}}\right)^2} \quad (4.20)$$

$$Q_{01} = \frac{T_6 \cdot d_M (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{Э}}{Q_{ЭFEC}}\right)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2| \cdot l_{\alpha}}} \quad (4.21)$$

### Третий этап.

$$L_{д1} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{Э}}{Q_{ЭFEC}}\right)^2}{8 \cdot \left(\frac{|\beta_2 \cdot l_1 + \beta_{2k} \cdot l_k|}{l_{\alpha}}\right)} \quad (4.22)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,75 \cdot L_{д2}}{L_{д2}}\right)^2} \quad (4.23)$$

$$Q_{02} = \frac{T_6 \cdot d_M (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{Э}}{Q_{ЭFEC}}\right)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2 \cdot l_1 + \beta_{2k} \cdot l_k|}} \quad (4.24)$$

Известно, что

$$D_{общ} = D_{ов} \cdot L_{ов} + D_{овкд} \cdot L_{овкд} \quad (4.25)$$

$$A_{общ} = a_{ов} \cdot L_{ов} + a_{овкд} \cdot L_{овкд} \quad (4.26)$$

В данных выражениях  $D$  - параметр хроматической дисперсии ОВ оптического волокна, ОВКД - волокна для компенсации дисперсии, а  $L$  – соответствующие длины,

$A$  – параметр коэффициента затухания для соответствующих оптических волокон и длин.

Необходимо, чтобы для компенсации дисперсии  $D_{\text{общ}} = 0$ .

Мера ОВКД  $FOM = -D_{\text{ОВКД}} |A_{\text{ОВКД}}|$  и  $A_{\text{общ}} = (A_{\text{ОВ}} + D_{\text{ОВКД}} |FOM|) \cdot L_{\text{ОВ}}$

Для компенсации наклона необходимо, чтобы

$$S = S_{\text{ОВ}} \cdot L_{\text{ОВ}} + S_{\text{ОВКД}} \cdot L_{\text{ОВКД}} \quad (4.27)$$

$$R \cdot D_{\text{ОВ}} \cdot S_{\text{ОВ}} = R \cdot D_{\text{ОВКД}} \cdot S_{\text{ОВКД}}, \text{ где } R \cdot D \cdot S = S/D$$

Данный подход широко известен, и не вдаваясь подробно в данную технологию решения компенсации хроматической дисперсии можно использовать для высокоскоростных систем передачи следующий подход, основанный на дисперсии групповых скоростей:

$$\beta_2 = \beta_{2\text{ОВ}} \cdot L_{\text{ОВ}} + \beta_{2\text{ОВКД}} \cdot L_{\text{ОВКД}} \quad (4.28)$$

На основании данного решения, используя решения для дисперсионной длины можно определить длину по затуханию с учетом допустимых потерь на хроматическую дисперсию с учетом компенсации дисперсии на усилительном участке:

$$L_{\alpha_{\text{доп}}} = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot \frac{(|\beta_{2\text{ОВ}} \cdot L_{\text{ОВ}} + \beta_{2\text{ОВКД}} \cdot L_{\text{ОВКД}}|)}{(L_{\text{ОВ}} + L_{\text{ОВКД}})}} \quad (4.29)$$

Воспользовавшись данным выражением, определим необходимую длину оптического волокна для компенсации дисперсии при минимальных потерях в пределах 1 дБ:

$$L_{\alpha_{\text{доп}}} = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{FEC}}}\right)^2}{8 \cdot \frac{(|\beta_{2\text{ОВ}} \cdot L_{\text{ОВ}} + \beta_{2\text{ОВКД}} \cdot L_{\text{ОВКД}}|)}{(L_{\text{ОВ}} + L_{\text{ОВКД}})}}$$

$$8 \cdot (|\beta_{20B} \cdot L_{0B} + \beta_{20BKD} \cdot L_{0BKD}|) = 0,75 \cdot T_0^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2$$

$$8 \cdot \beta_{20BKD} \cdot L_{0BKD} = 0,75 \cdot T_0^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2 - 8 \cdot |\beta_{20B}| \cdot L_{0B}$$

$$L_{0BKD} = \frac{0,75 \cdot T_0^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2 - 8 \cdot |\beta_{20B}| \cdot L_{0B}}{8 \cdot \beta_{20BKD}} \quad (4.30)$$

Для потерь на дисперсию в пределах 2дБ:

$$L_{0BKD} = \frac{1,25 \cdot T_0^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2 - 8 \cdot |\beta_{20B}| \cdot L_{0B}}{8 \cdot \beta_{20BKD}} \quad (4.31)$$

В этом случае:

$$L = \frac{0,75 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2}{\frac{8 \cdot (|\beta_{20B} \cdot L_{0B} + \beta_{20BKD} \cdot L_{0BKD}|)}{(L_{0B} + L_{0BKD})}} \quad (4.32)$$

В результате получено решение по хроматической дисперсии и её компенсации на линии. Зная длину линии и все элементы без компенсаторов ПМД определим ПМД1 и ПМД2:

$$\text{ПМД1} = 3,7 \cdot \sqrt{N \cdot (\tau_{0B}^2 \cdot L_{0B}^2 + \tau_{0BKD}^2 \cdot L_{0BKD}^2 + \sum \tau_{\text{элементов}}^2)} \quad (4.33)$$

$$\text{ПМД2} = (\text{ПМД1})^2 / \sqrt{3} \quad (4.34)$$

$$(\text{ПМД1})^2 + \text{ПМД2} = \text{ПМД} \quad (4.35)$$

В результате:

$$L = \frac{0,75 \cdot 0,9 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2}{8,8 \cdot (|\beta_{20B} \cdot L_{0B} + \beta_{20BKD} \cdot L_{0BKD}|) / (L_{0B} + L_{0BKD})} \quad (4.36)$$



Окончательное решение по учёту и компенсации ПМД принимается после предварительного полного расчета и компенсации линии по хроматической дисперсии. При дифференциальной модовой задержке, равной  $0,5 \cdot T_6$  коэффициент битовых ошибок (КБО) будет равен  $10^{-3}$ , а при норме  $0,1 \cdot T_6$  КБО равен  $10^{-9}$ . Поэтому следует решить задачу, как по компенсации хроматической дисперсии, так и по поляризационной модовой дисперсии.

Хроматическая и поляризационная дисперсия являются ограничивающим фактором при передаче по оптическому волокну на дальние расстояния при высоких скоростях передачи 10-100 Гбит/с скорее, чем потери ОВ по затуханию (1-5). Дисперсия не только приводит к уширению передающего импульса, но и к дополнительным потерям. Оптические усилители не разрешают эту задачу, а в ряде случаев усугубляют, усиливая уширяющий сигнал и внося дополнительные потери, как за счет хроматической (ХД), так и за счет поляризационной (ПМД) дисперсии. При малых скоростях передачи до 10 Гбит/с с поляризационной дисперсией считаются мало, все внимание уделяя хроматической дисперсии. Используются электронные методы компенсации ХД как на передатчике, так и на приемнике оптических сигналов. На линии используется двухкаскадное усиление с применением оптических волокон для компенсации дисперсии (ОВКД). Наиболее распространенный метод – это применение двухмодовых ОВ и Бреговских решеток. Применяется так же техника среднепролетной спектральной инверсии, широкополосная компенсация в ВОСП-СР для увеличения системной емкости.

#### Четвертый этап.

$$L_{дз} = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M = 4)^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2}{8 \cdot \left[ \frac{|\beta_2 \cdot l_2 + \beta_{2k} \cdot l_k|}{l_\alpha} + \text{ПМД}^2 \right]} \quad (4.37)$$

Таким образом, при выборе ОВ и системы передачи с ВОСП-СР необходимо учитывать следующие исходные данные для оптимальных расстояний между усилителями и регенераторами:

$$1) L_{д} = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2}{|\beta_2|} = \frac{T_{05}^2 \cdot d_m^2}{2,77 \cdot |\beta_2|} = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta_2|}, \text{ км}$$

$$2) L_{нл} = \frac{1}{\gamma \cdot P_0}, \text{ км}$$

$$3) L_{эфф} = \frac{1 - e^{-\alpha_1}}{a}, \text{ км}$$

$$4) L_{зат} = \frac{S - S_1 - 2 \cdot a}{\alpha + \frac{a_1}{l_{сд}}}, \text{ км}$$

5) ООСШ=16,9 при Q-фактор=7, что соответствует вероятности ошибки  $10^{-12}$  для всей системы в целом электрическом канале.

6) ООСШ=4,23 дБ в оптическом канале, что соответствует вероятности ошибки  $10^{-10}$ .

При выборе ООСШ необходимо знать исходные данные:

1) Допуск на дисперсию  $\sigma = \frac{T_6}{4}$  при потерях на дисперсию 1 дБ.

2) Наличие нелинейных эффектов, например, фазовой самомодуляции.

3) Длину участка (регенерационного или усилительного) по затуханию (например, 80 км) при известных потерях компонентах линии.

4) Формат модуляции  $d_m$ .

5) Выбор расстояния между каналами.

6) Общая длина линии для выбора необходимого числа усилителей и числа пролетов.

7) Характеристика передатчика и приемника.

8) Количество каналов ВОСП-СР, наличие начальной линейной модуляции лазера и ряд других характеристик.

В расчетную длину пролета укладывается  $L_{д}$ ,  $L_{нл}$ ,  $L_{эфф}$  и значительно ее превышает  $L_{пмд}$ . Вычисляем  $L_{пмд}$ :

$$L_{\text{пмд}} = \frac{T_0^2 \cdot 0,01}{\text{ПМД}^2} = \frac{0,001 \cdot 2,828 \cdot T_0^2}{\text{ПМД}^2} = \frac{0,08 \cdot T_0^2}{\text{ПМД}^2} = \frac{0,029 \cdot T_1^2}{\text{ПМД}^2} \quad (4.38)$$

Для качественной передачи оптических сигналов на высоких скоростях передачи необходимо знать требования, предъявляемые к оптическому волокну:

- дисперсионную длину  $L_{\text{д}}$ , км для выбранной системы модуляции;
- нелинейную длину  $L_{\text{нл}}$ , км;
- эффективную длину  $L_{\text{эфф}}$ , км;
- длину по поляризационной модовой дисперсии  $L_{\text{пмд}}$ , км;
- длина по затуханию  $L_{\text{а}}$ , км;
- отношение сигнал/шум в оптическом канале для данной системы передачи и данного ОВ;
- отношение сигнал/шум в электрическом канале;

При определении отношения сигнал/шум, в электрическом и оптическом каналах, необходимо знать:

1. Допуск на хроматическую дисперсию при потерях на эту дисперсию 1-2 дБ;
2. Наличие нелинейных эффектов;
3. Длина усилительного (регенерационного) участка по затуханию;
4. Формат модуляции;
5. Наличие предварительной коррекции ошибки 1-3 поколения;
6. Выбор расстояния между каналами в зависимости от скорости передачи и системы передачи ВОСП-СР;

Дополнительные потери оптического тракта усиливают деградацию источника излучения, а минимальный уровень приема гарантирует величину коэффициента ошибок регенератора. Полученные результаты позволяют определить допустимые длины регенерационного или усилительного участков с учетом нормативных

значений вероятности ошибки на основании Q-фактора, который определяет отношение сигнал/шум в оптическом канале.

#### 4.2 Расчетные и измерительные методы сравнения полученных результатов

Основная проблема с PMD в оптических волоконных системах заключается в ее стохастической природе, а именно основное состояние поляризации (PSP) и DGD меняется по шкале времени от миллисекунд (акустические колебания) до месяцев (температурные изменения подземного оптоволокна). Редкие явления чрезвычайно высоких значений DGD запрещает проектирование систем в расчете на наихудший случай распределения фиксированных запасов OSNR, чтобы предусмотреть все возможные вызванные PMD искажения сигнала. Вместо этого в системе назначаются некоторые разумные запасы (например, 1 дБ), и редкое явление, когда DGD превышает запас, приводит к *отказу системы*. Надлежащее определение вероятности отказа является важным связующим звеном между изготовителями волокна, системными интеграторами и провайдерами. Если на требования отсутствия отказов нельзя ответить, то PMD нужно *компенсировать* в каждом канале в приемнике или увеличивать устойчивость к PMD соответствующего формата модуляции, используя оптические или электронные методы *выравнивания* или *смягчения*.

Установлено, что в системах с усилителями и длинными пролетами, применяющими скремблеры поляризации (устройства, принудительно модулирующие состояние поляризации лазерного сигнала так, чтобы он казался неполяризованным) ПМД вызывает увеличение степени поляризации такого сигнала. Это ухудшает показатели системы из-за взаимодействия с потерями, обусловленными поляризацией и поляризационному провалу усиления. В аналоговых системах взаимодействие потерь и модовой дисперсии с лазерным чирпом приводит к искажению второго порядка, пропорциональным частоте модуляции. Дальнейшее ухудшение от эффектов второго порядка, не зависящих от частоты модуляции, происходит при наличии дополнительных потерь от поляризации. Эффект второго порядка объединяет хроматическую и

поляризационную модовую дисперсии., так как групповая дифференциальная задержка зависит от длины волны и статистическому вкладу в хроматическую дисперсию.

Осуществляя компенсацию хроматической дисперсии с помощью ОВ для компенсации на линии с  $N$  количеством усилителей, мы увеличиваем поляризационную модовую дисперсию при высоких скоростях передачи. Для ограничения ПМД используют понятие вероятности (часто  $10^{-5}$  или 5 мин/год) для большинства систем.

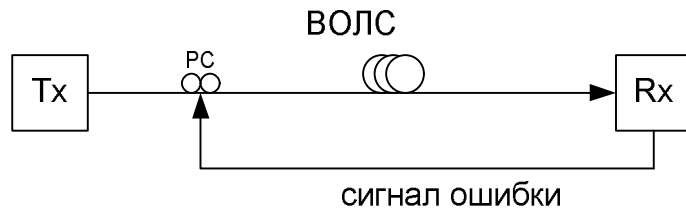
Техника компенсации ПМД может быть в оптическом канале или электрическом. Выравнивание ПМД в электрическом приемнике осуществляется с помощью фильтров. Фильтр делит электрический сигнал на несколько ветвей, используя умножение линий задержки и затем комбинируя их на выходе. Это решение не может решить задачу полностью, т.к. не может оценить задержки между двумя PSP (правильное положение вектора поляризации). Оптический компенсатор также использует линию задержки. Она может включаться на линии (на месте усилителя) или только перед приемником.

Успех применения зависит от отношения  $L/L_{\text{ПМД}}$ , где  $L$  длина ОВ, а  $L_{\text{ПМД}} = \frac{T_6^2}{2 \cdot D_{\text{ПМД}}^2}$ . Это отношение не должно быть больше 4 ( $\frac{L}{L_{\text{ПМД}}} \leq 4$ ).

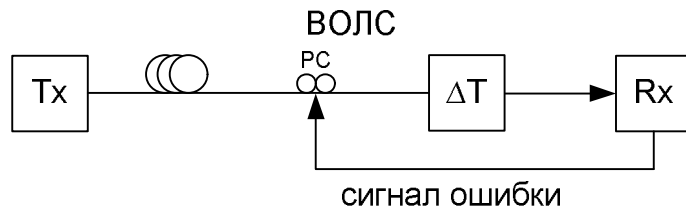
Существуют и другие решения по компенсации ПМД. Большинство компенсаторов помогают скомпенсировать только ПМД. Поэтому следует использовать оптические компенсаторы перед приемником или электрические в приемнике.

Из 6 представленных схем наиболее целесообразной является схема  $f$ . Остальные являются более сложными. На рисунке 20 представлены схемы компенсации дисперсии:

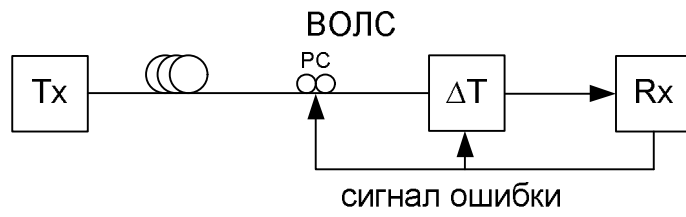
а)



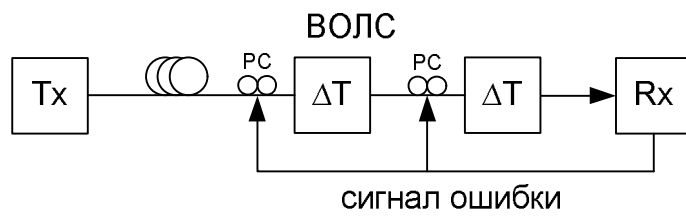
b)



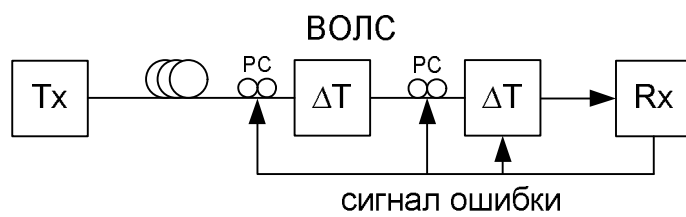
c)



d)



e)



f)

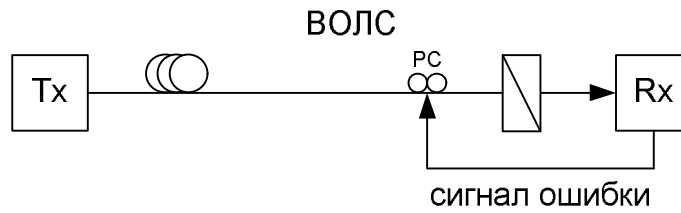


Рис. 20. а) PSP метод с 2 степенями свободы.

б) PC (контроллер поляризации)+фиксированная задержка (2 степени свободы).

с) PC+переменная задержка (3 степени свободы).

д) 2PC+2 фиксированных задержки.

е) 2PC+1 фиксированная+1 переменная задержка (5 степеней свободы).

ф) PC+поляризатор (2 степени свободы).

Из работы получены следующие результаты по схемам компенсации ПМД.

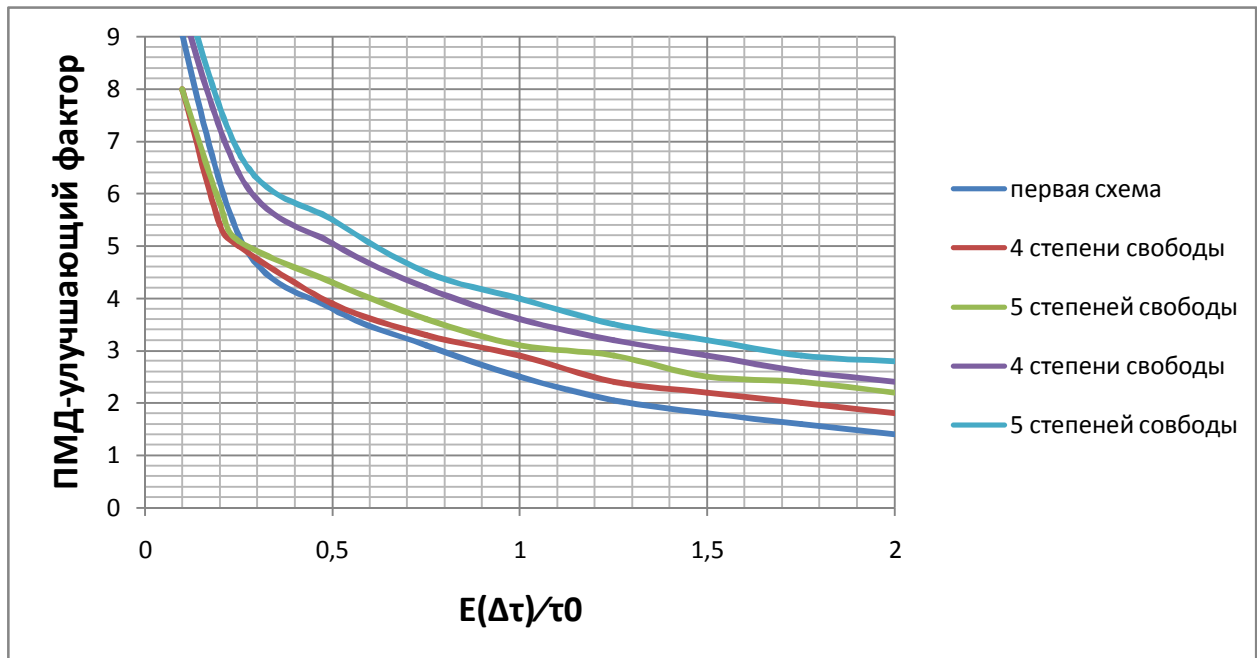


Рис.21. Зависимость ПМД от схемы компенсации дисперсии

Допустимая средняя ДГЗ на  $T_6$  «а» для форматов модуляции NRZ и RZ при использовании различных схем компенсаторов при вероятности простоя  $10^{-3}$ .

Таблица 4.9 Допустимая ДГЗ для различных схем компенсации

Компенсаторы	NRZ	RZ
	а, %	а, %
Нескомпенсировано	17	22
1-го порядка	36	31
PSP	36	32
2 степени свободы	36	33
3 степени свободы	43	35
4 степени свободы	45	35
Поляризатор	23	22

Согласно исследованиям формат RZ лучше при нескомпенсированных условиях, а применение компенсаторов более эффективно при формате NRZ.

$$\Delta\tau_{\text{ср}} = \text{PMD} \cdot \sqrt{L} \quad (4.39)$$

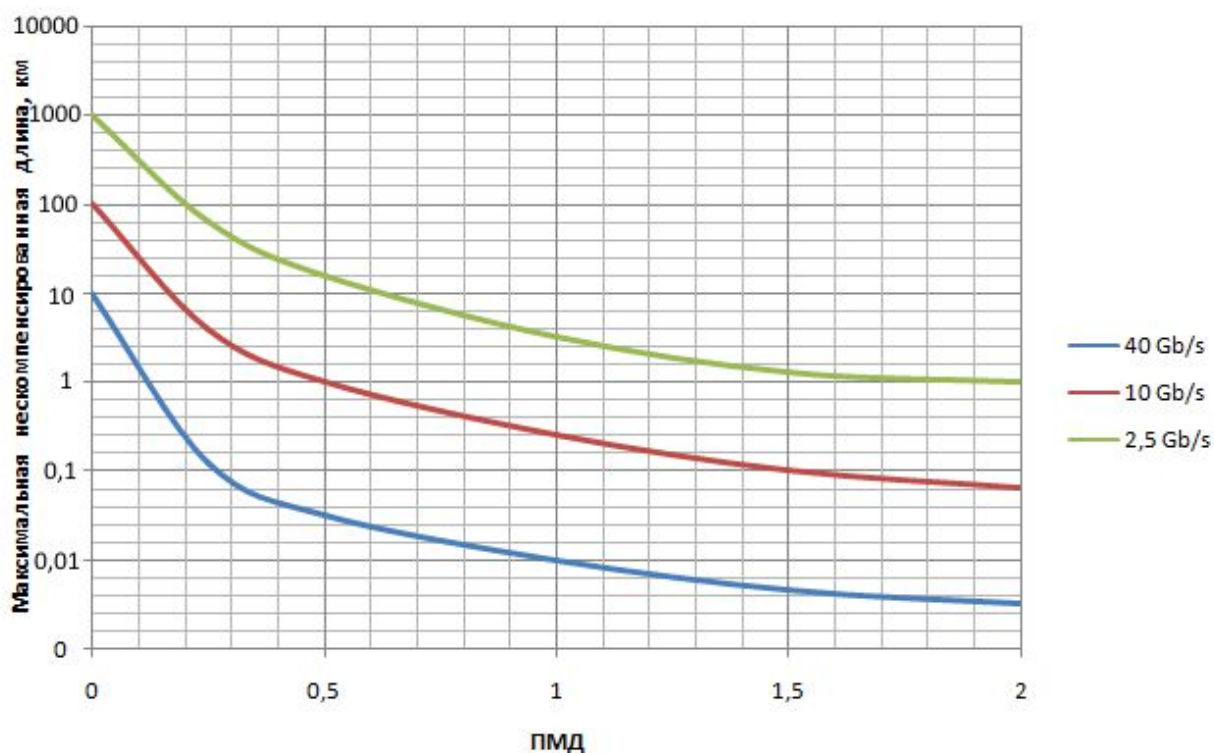


Рис 22. Зависимость ПМД от В



Приведенные схемы компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий позволяют скомпенсировать только поляризационную модовую дисперсию с уже скомпенсированным решением по хроматической дисперсии.

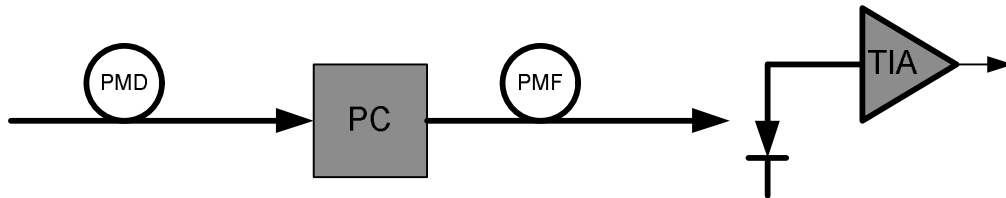


Рис. 23 Простая архитектура построения оптического компенсатора ПМД.

PC – контроллер поляризации;

PMF – ОВ с ПМД;

TIA – трансимпедансный усилитель;

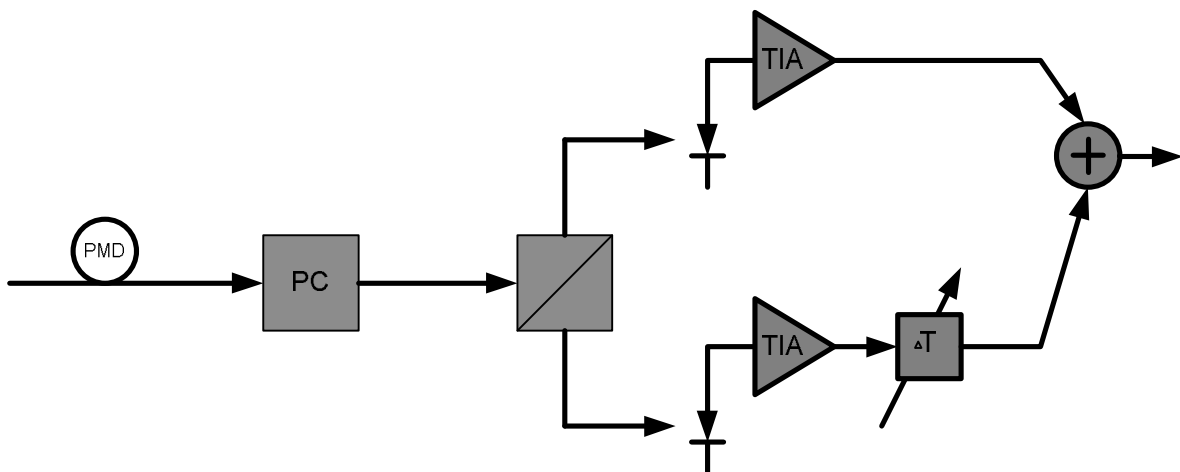


Рис. 24. Типичная схема оптоэлектронного компенсатора ПМД.

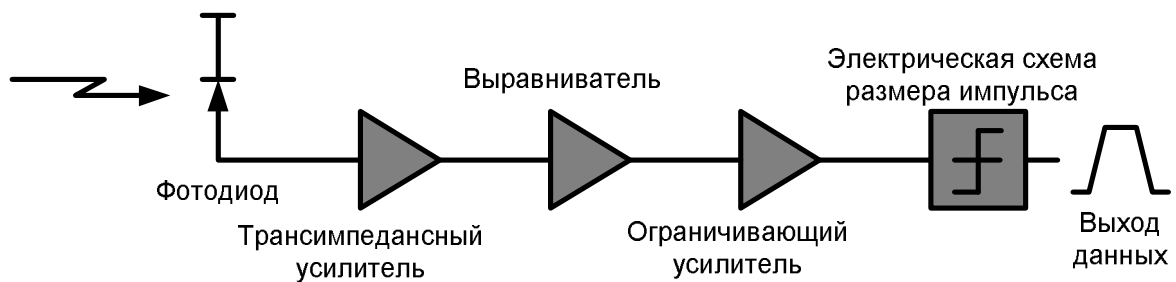


Рис. 25. Блок диаграмма оптического приемника, включая электронный компенсатор ПМД.

В следующей схеме в начальной и конечной точках системы вводится контроллер поляризации. На выходном контроллере поляризации установлен расщепитель поляризованного луча, используемый для генерации сигнала ошибок. Выходной поляризатор наблюдает за сигналом ошибки, а входной поляризатор настраивает так, чтобы минимизировать этот сигнал ошибки. В точке отсутствия сигнала ошибки на выходе, состояние входного поляризатора является одним из основных состояний данной системы.

Необходимым условием является знания требуемой длины линии, типа оптического волокна, числа каналов для ВОСП-СР и скорости передачи. При скоростях передачи 10-100 Гбит/с необходимым условием является предварительная оценка требуемого значения отношения сигнал/шум, при выбранной длине усилительного участка и необходимого числа усилительных пунктов, наличие усилителей мощности, компенсаторов хроматической дисперсии и предусилителей. Все эти элементы вместе с другими элементами, кроме изоляторов, фильтров и т.д., оптического волокна, также оказывают влияние на значение поляризационной дисперсии волоконной линии связи.

Для того, чтобы сравнить полученные решения по компенсации хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии были использованы результаты экспериментов, по полевым исследованиям линии 40 Гбит/с с длиной усилительного участка 100 км с длиной линии 800 км на ОВ со смещенной дисперсией. При компенсации хроматической дисперсии ПМД оказывает существенное влияние на всех рабочих длинах волн. Групповая задержка зависит от входного положения поляризации (SOP).

В исследованиях на  $\lambda=1550$  нм дисперсия групповых скоростей  $D=0,13$  пс/нм·км, затухание сигнала 0,21 дБ/км,  $S_{\text{хд}}=0,066$  пс/нм<sup>2</sup>·км, ПМД ОВ=0,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ , средняя величина ПМД=0,25 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

Была возможность сравнить полученные решения по Q-фактору без ПМД и с ПМД при фиксированном значении входной поляризации.

Следует подчеркнуть, что при компенсации хроматической дисперсии и увеличении числа промежуточных усилителей поляризационная модовая дисперсия увеличивается и не компенсируется при компенсации хроматической дисперсии с помощью компенсирующих оптических волокон и различных компенсаторов хроматической дисперсии.

Согласно рисунку 26 Q-фактор в значительной мере зависит от угла поляризации, поэтому на рисунке 27 получены значения уже при фиксированном входном угле поляризации, где отличия Q-фактора могут отличаться на 1-2 дБ, и входной угол ПМД может внести коррективы и добавить еще 1 дБ в худшем случае. Кроме того, остаточная хроматическая дисперсия может добавить или уменьшить влияние ПМД на Q-фактор. Так, при значении  $D=0,2$  пс/нм·км,  $\beta_2=0,255$  пс<sup>2</sup>/км, разброс значения Q-фактора может быть в пределах 7-30 дБ, а при меньших значениях  $D=0,14$  пс/нм·км эти колебания лежат в пределах 7-17 дБ. Полученные нами результаты расчета могут уложиться в более большие значения  $D_{\text{комп}}=0,18$  пс/нм·км и полученный Q-фактор укладывается в диапазон 7-30 дБ,  $\text{ПМД}_{\text{ср}}=0,25$  пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

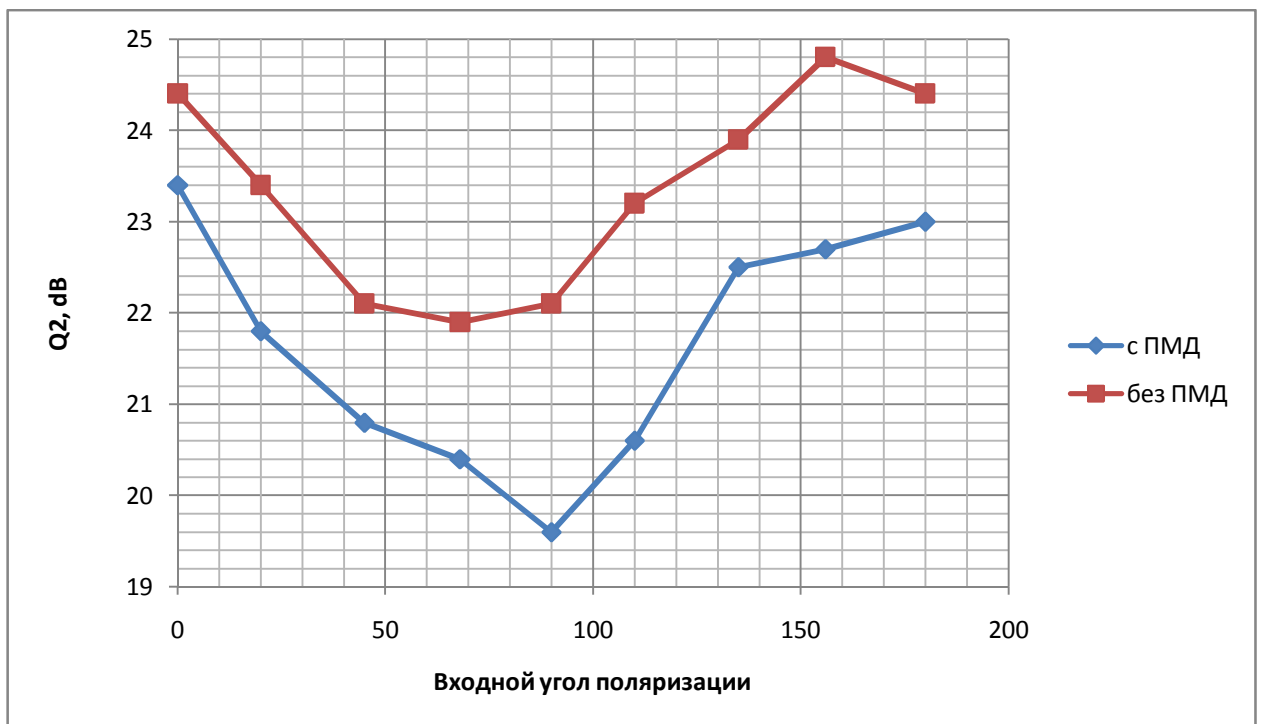


Рис. 26. Зависимость Q<sup>2</sup>-фактора при наличии и отсутствии ПМД=0,1 пс/ $\sqrt{\text{км}}$

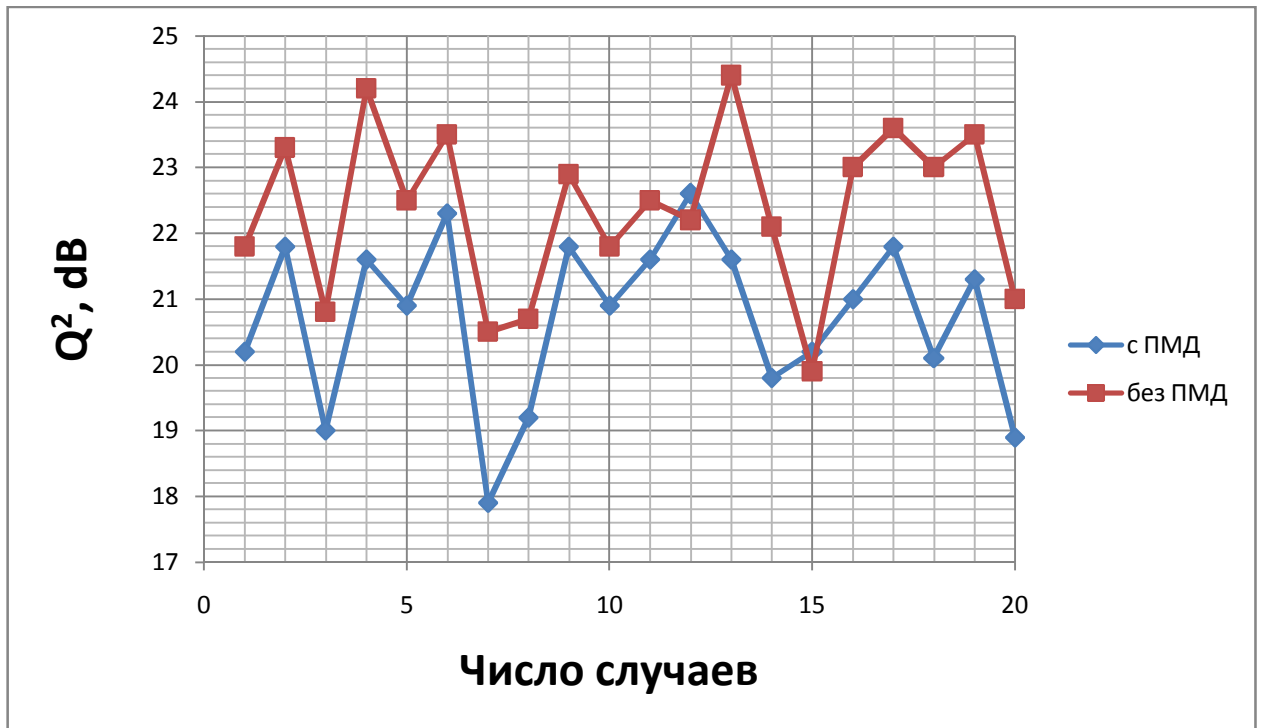


Рис. 27. Зависимость Q-фактора от числа случаев при фиксированном положении PSP при наличии и отсутствии ПМД.

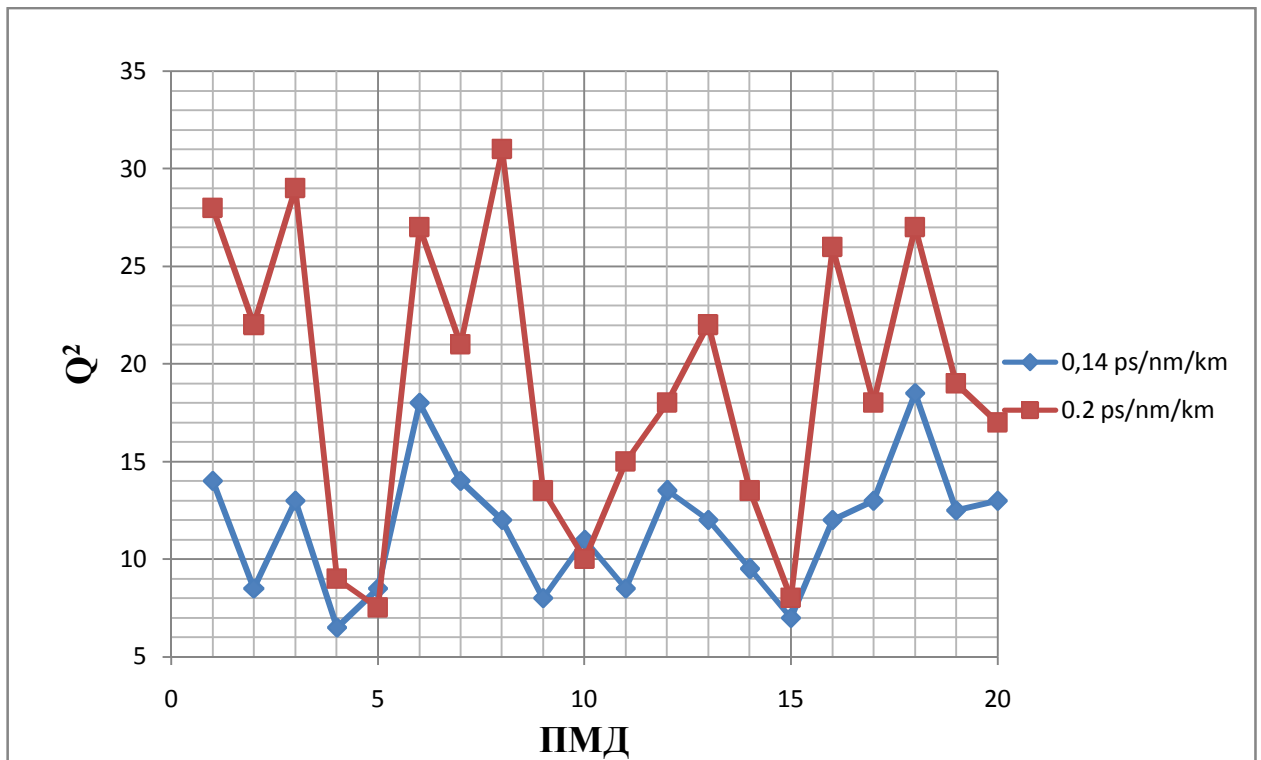


Рис. 28. Зависимость Q-фактора от значения хроматической дисперсии и наличия ПМД.

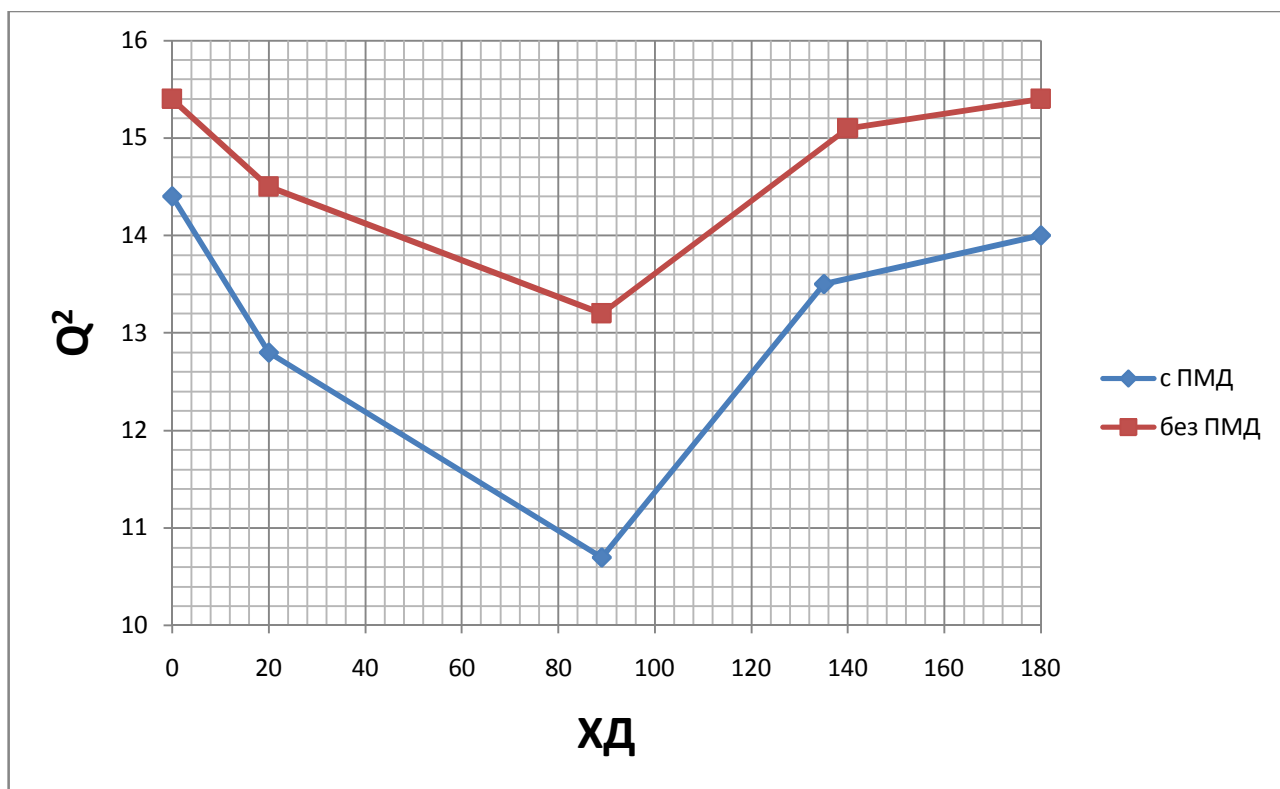
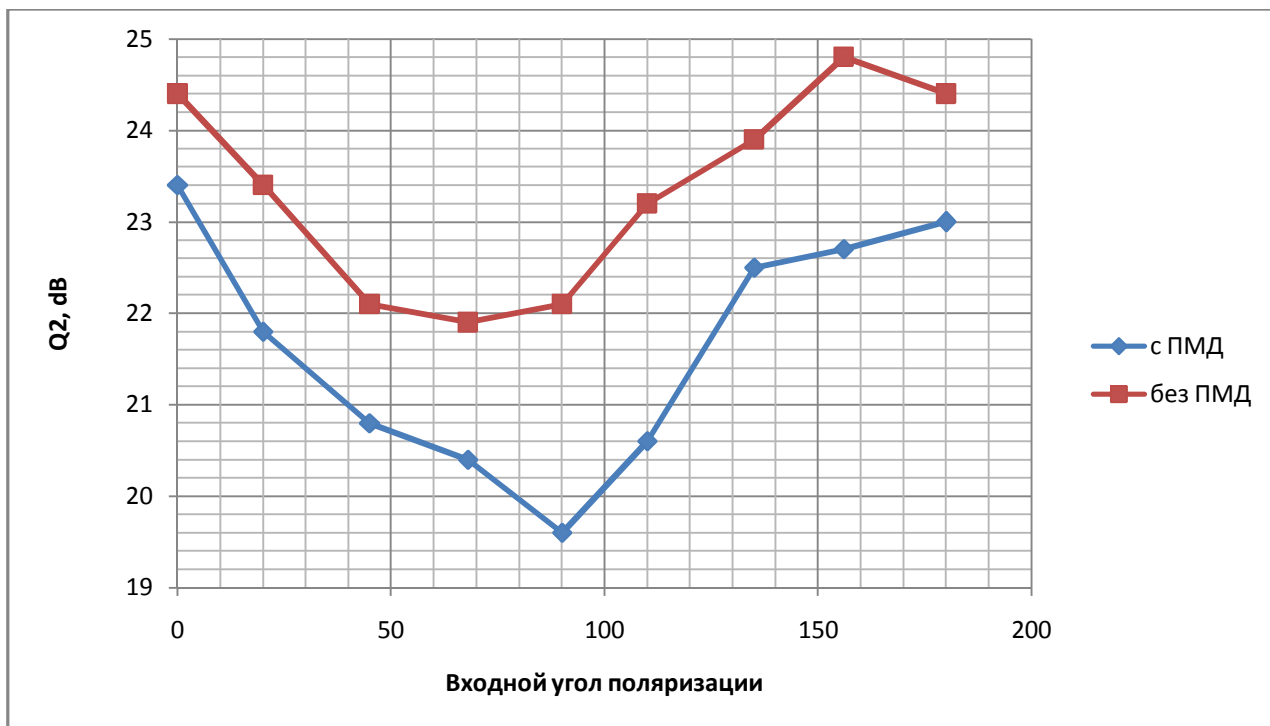


Рис. 29. Зависимость Q-фактора от ХД с ПМД и без ПМД

Опуская алгоритм решения поставленной задачи, воспользуемся последними выражениями:

$$l_{yy} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8 \cdot |\beta_2|_{\text{ост}}} \quad (4.40)$$

Определение длины усилительного участка без учета ПМД и упреждающей коррекции ошибки и с учетом ПМД:

$$l_{yy} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8 \cdot (|\beta_2|_{\text{ост}} + \text{ПМД}^2)} = \frac{T_6^2 \cdot d_M^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8,8 \cdot |\beta_2|_{\text{ост}}} \quad (4.41)$$

Где  $|\beta_2|_{\text{ост}}$  - остаточное значение  $|\beta_2|$  после компенсации с помощью компенсирующих оптических волокон. Учитывая  $l_{yy}=100$  км,  $B=40$  Гбит/с,  $|\beta_2|_{\text{ост}}$  без учета ПМД будет равна  $3,125$  пс<sup>2</sup>/км, а  $|\beta_2|_{\text{ост}}$  с учетом ПМД будет равна  $3,4375$  пс<sup>2</sup>/км, ПМД=0,56 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

$$Q_{01} = \frac{T_6 \cdot d_M \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{2 \cdot \sqrt{3,125 \cdot 100}} = 1,414 \rightarrow Q_3 = 4 \cdot 20 \lg Q = 12 \text{ дБ}$$

$$Q_{01} = \frac{T_6 \cdot d_M \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{2 \cdot \sqrt{3,4375 \cdot 100}} = 1348 \rightarrow Q_3 = 3,3 \cdot 20 \lg Q = 10,4 \text{ дБ}$$

Полученные результаты соответствуют соотношениям:

$$Q_1^2 = 22 \text{ дБ для полученных результатов расчета } 12 \text{ дБ;}$$

$$Q_2^2 = 19,5 \text{ дБ для полученных результатов расчета } 10,4 \text{ дБ;}$$

$$\text{Для } 22 \text{ дБ } Q_1 = 13 \rightarrow Q_{01} = 1,899;$$

$$\text{Для } 19,5 \text{ дБ } Q_2 = 9,5 \rightarrow Q_{02} = 1,756;$$

Исходя из этих значений:

$$1,899 = \frac{T_6 \cdot d_M \cdot 3,33 \cdot \lg(M)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_{21}| \cdot 100}} \rightarrow \beta_2 = 1,73 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$$

$$\beta_2 = 1,73 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$$

$$1,756 = \frac{T_6 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg(M)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_{22}|} \cdot 100} \rightarrow \beta_2 = 2,03 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}}$$

$$\text{ПМД} = 0,545 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$$

В первом случае ПМД=0,56 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ . Ошибка: 1,5%

Согласно рисунку 27 отличие  $Q^2$  без учета ПМД и с учетом ПМД при фиксированном значении PSP отличается на 1,0-2,0 дБ. Полученные результаты расчетов подтверждаются результатами эксперимента, исходя из значения ПМД=0,545 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

Учитывая результаты экспериментов примем с учетом компенсации ХД:

$$\beta_2 = 0,255 \frac{\text{пс}^2}{\text{км}} \text{ без учета ПМД, ПМД} = 0,25 \frac{\text{пс}}{\text{км}}$$

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l}} = 2,47 \rightarrow 37,5 \rightarrow 31,5 \text{ дБ}$$

С учетом ПМД:

$$Q_0 = \frac{T_6 \cdot d_m}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot l + \text{ПМД}^2 \cdot l}} = 2,22 \rightarrow 24,3 \rightarrow 27,7 \text{ дБ}$$

Согласно рисунку 4.9 и 4.10 при 10 случаях  $Q^2$  при  $\beta_2=0,255 \text{ пс}^2/\text{км}$  равна 32 дБ, с учетом ПМД (0,25 пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ) получаем 27,7 дБ.

ПМД начинает играть значительную роль при малых значениях  $\beta_2$  (остаточное затухание дисперсии групповых скоростей после компенсации с помощью компенсирующих ОВ).

На рисунке 30 показана зависимость поляризационно-зависимой хроматической дисперсии как функции длины волны ОВ с величиной ДГЗ=14,7 пс.

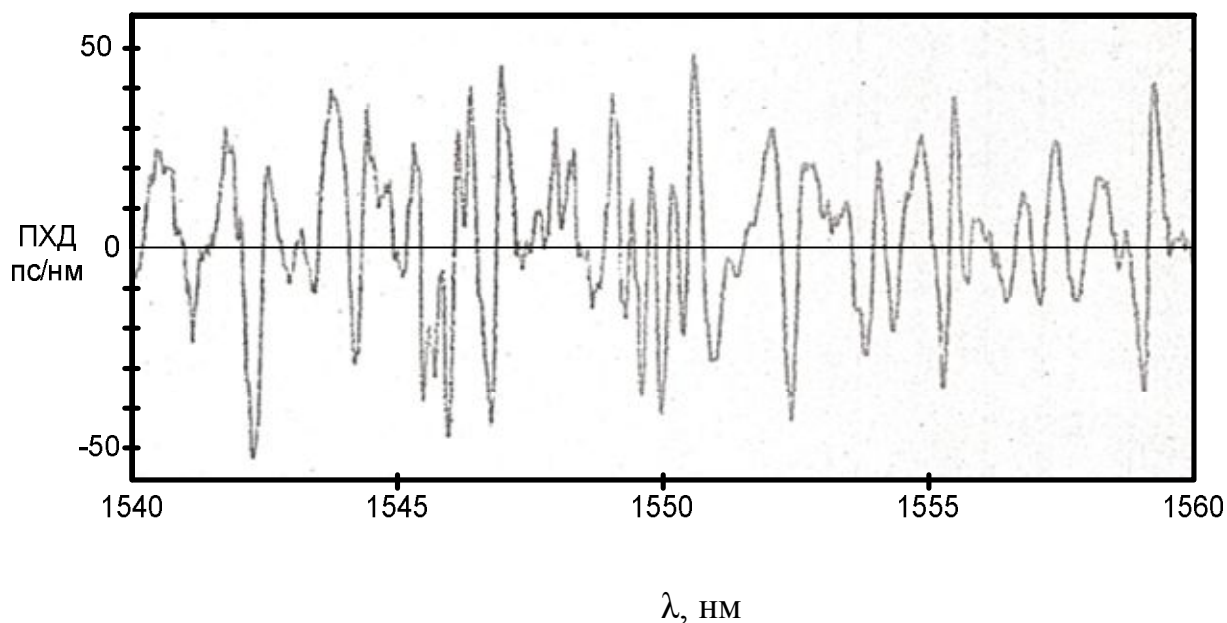


Рис. 30. Поляризационно-зависимая хроматическая дисперсия как функция  $\lambda$  для ОВ с ДГЗ=14,7 пс (при  $D \cdot l = D \cdot l \pm \frac{1}{2} \cdot \Delta\text{ПМД}_x$ ;

$$\Delta\text{ПМД}_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \Delta\text{ПМД}_{10})$$

Как показано выше, ПМД зависит от ДГЗ, что приводит к искажению и уширению оптических импульсов.

В реальных системах ВОСП-СР следует учитывать поляризационно-зависимые потери (ПЗП), связанные с переменными оптическими компонентами линии. На рисунке 31 представлена зависимость Q-фактора как средней величины ПЗП ВОЛП для нескольких значений ДГЗ.



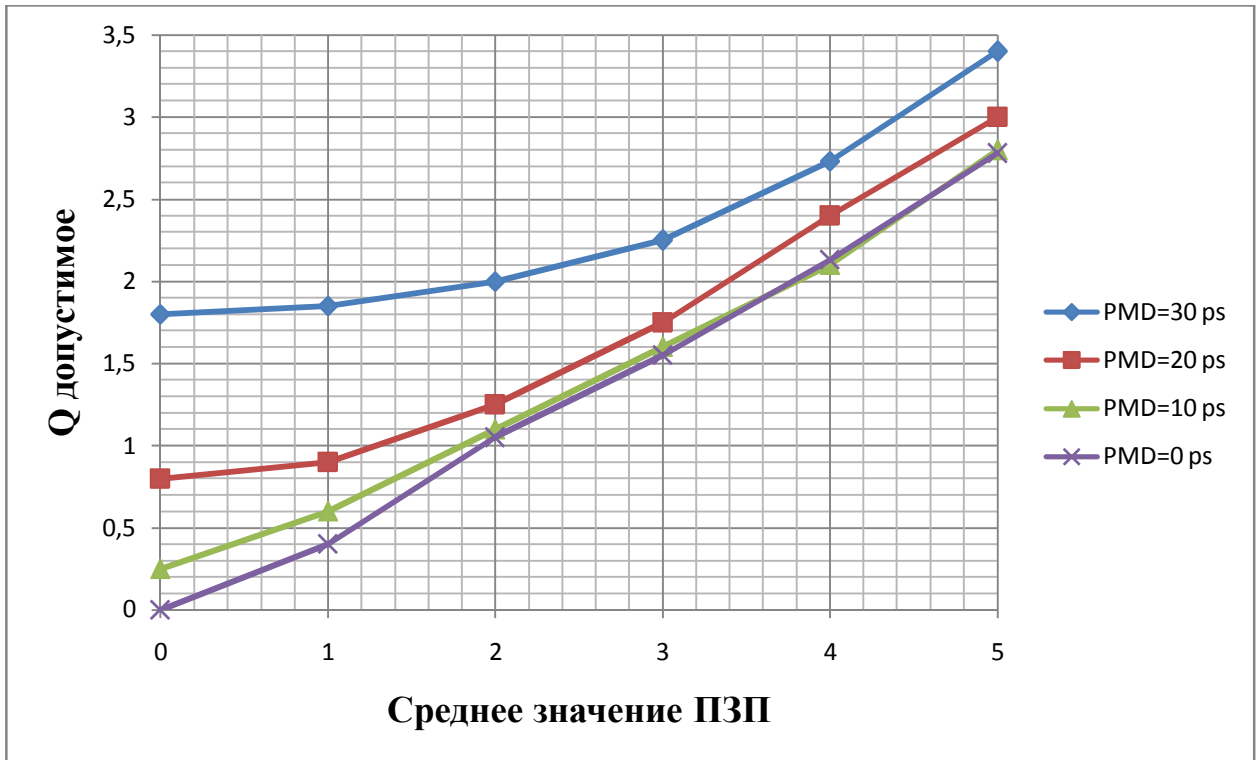


Рис. 31. Зависимость среднего значения ПЗП от Q-допустимых потерь для нескольких значений ПМД.

Решение реализуется выражением:

$$\left(10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}\right)^2 = \text{ПМД}^2 \cdot l \cdot (1 + 0,111 \cdot \text{ПМД}^2 \cdot l) \quad (4.42)$$

### Выводы по четвертой главе:

1. Необходимым условием является знания требуемой длины линии, типа оптического волокна, числа каналов для ВОСП-СР и скорости передачи. При скоростях передачи 10-100 Гбит/с необходимым условием является предварительная оценка требуемого значения отношения сигнал/шум, при выбранной длине усилительного участка и необходимого числа усилительных пунктов, наличие усилителей мощности, компенсаторов хроматической дисперсии и предусилителей. Все эти элементы вместе с другими элементами, изоляторами, фильтрами и т.д., оптического волокна, также оказывают влияние на значение поляризационной дисперсии волоконной линии связи. Определение предварительного значения при выбранном числе усилительных участков отношения сигнал/шум позволяет оценить необходимость решения по компенсации хроматической дисперсии.

2. При бинарном формате модуляции для коэффициента битовой ошибки  $10^{-9}$  типовое требуемое значение отношения сигнал/шум для скорости передачи 10 Гбит/с составляет 18 дБ, для скорости 40 Гбит/с -24дБ. Для скорости 100 Гбит/с - 28 дБ. Накапливаемый шум ограничивает достижение необходимого расстояния. Пути преодоления влияния шума: уменьшение потерь передачи, уменьшение шума усилителей, увеличение передаваемой мощности, использование рамановских усилителей.

	100Гбит /с; НВО	100Гбит/с; бинарный	100Гб ит/с ВО- DQPS К	100Гбит/с 4– ПОЛЯР -DQPSK 5	40Гбит /с бинарн ый	10Гбит/с бинарны й
Требуемый ОСШ	21дБ	25дБ	18дБ	16дБ	14- 15дБ	8-9дБ
ДГЗ (хТб)	3пс	3пс	8пс	Большое,	10пс	40пс

(1дБ)				когерентн ось		
ХД (0,6Тб) (2дБ)	8пс/нм	25пс/нм	26пс/н м	Большое, когерентн ось	50пс/н м	800...200 0пс/нм

3. Использование предварительной коррекции ошибки позволяет снизить значение отношения сигнал/шум на 6 дБ. Решение для длины усилительного участка по затуханию для данной скорости передачи позволяет решить задачу по компенсации хроматической дисперсии (с учетом хроматической дисперсии высшего порядка). Зная все значения по всем элементам и их количество, с учетом значения поляризационной дисперсии оптического волокна, определяем значение поляризационной модовой дисперсии на линии. И сравниваем его с существующими нормами. Зная его возможное превышение относительно существующих норм, уменьшаем длину усилительного участка за счет поляризационной модовой дисперсии или применяем поляризационные компенсаторы дисперсии. Это позволяет уменьшить влияние ПМД на ВОЛС.

Чем больше скорость передачи (40, 100 Гбит/с), тем больше проявляется ПМД. Алгоритм решения задачи по определению ПМД определяется исходными данными:

- выбранным типом оптического волокна (ОВ),
- длиной проектируемой линии,
- системой передачи,
- методом модуляции,
- спектральным уплотнением,
- необходимой предварительной коррекцией ошибок,

-методом компенсации дисперсии.

Результирующая схема линии передачи чаще всего включает кроме промежуточных усилителей усилитель мощности и предусилитель. Решающим фактором при первоначальном расчете является относительное отношение сигнал/шум (ООСШ) и, следовательно, коэффициент битовых ошибок.

4. Для преодоления негативных воздействий на ООСШ используется предварительная коррекция ошибок (ПКО); для уменьшения влияния ПМД выбирается формат модуляции (RZ-DPSK), для преодоления воздействия хроматической дисперсии используются компенсирующие ОВ или электронная компенсация; нелинейность корректируется с помощью формата модуляции.

Типовое значение ООСШ требуемое для различных скоростей передачи при прямом детектировании при  $10^{-9}$  коэффициенте битовых ошибок приведено в таблице.

Таблица 4.4. Типовое значение ООСШ для различных скоростей передачи

Скорость передачи, Гбит/с	2,5	10	40	100
Qэ, треб., дБ	12	18	24	28
Qо , треб	1,414	1,68	2	2,26
Qэ, треб при КБО=10(-3)	4	8	16	26

5. Эмпирическое выражение для ООСШ представлено для длины волны 1550нм следующим выражением:

$$ООСШ(дБ) = 58 - 10 \cdot \lg N - N \cdot F - 10 \cdot \lg L + P_{\text{вых}} - 10 \cdot \lg M - K$$

6. Нелинейные эффекты ограничивают передачу и зависят от ряда факторов: скорости передачи, оптической мощности, оптического волокна, формата модуляции.

Уменьшить или ограничить это влияние можно выбором ОВ, выбором формата модуляции, оптической фазовой конфигурацией, дисперсионным решением, электронной техникой. Следует отметить, что коэффициент битовых ошибок возрастает при увеличении вводимой в ОВ мощности из-за нелинейности ОВ.

7. При учете потерь на хроматическую дисперсию до 2 дБ допустимая длина увеличивается по хроматической дисперсии до 51,7 км:

$$L = \frac{0,75 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2}{\frac{8 \cdot (|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovkd} \cdot L_{ovkd}|)}{(L_{ov} + L_{ovkd})}}$$

Зная длину линии и все элементы без компенсаторов ПМД определим ПМД1 и ПМД2:

$$\text{ПМД1} = 3,7 \cdot \sqrt{N \cdot (\tau_{ov}^2 \cdot L_{ov}^2 + \tau_{ovkd}^2 \cdot L_{ovkd}^2 + \sum \tau_{\text{элементов}}^2)}$$

$$\text{ПМД2} = (\text{ПМД1})^2 / \sqrt{3}; \quad (\text{ПМД1})^2 + \text{ПМД2} = \text{ПМД}$$

В результате:

$$L = \frac{0,75 \cdot 0,9 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2}{8,8 \cdot (|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovkd} \cdot L_{ovkd}|) / (L_{ov} + L_{ovkd})}$$

8. Окончательное решение по учёту и компенсации ПМД принимается после предварительного полного расчета и компенсации линии по хроматической дисперсии. При дифференциальной модовой задержке, равной 0,5Тб коэффициент битовых ошибок (КБО) будет равен  $10^{-3}$ , а при норме 0,1 Тб КБО равен  $10^{-9}$ . Поэтому следует оптимально решить задачу как по компенсации хроматической, так и по поляризационной модовой дисперсии. ПМД1 переходит в эхоподобный импульс, уширяющийся после детектирования. Уширяющийся импульс распространяется в каждый другой импульс, ухудшая допустимые нормы. Величина допустимых значений зависит от:

-отношения ДГЗ к степени модуляции,

- отношения разделения импульса в ОВ между двумя поляризациями,

-формата модуляции, типа приемника, характеристик приемника и др.

9. При потерях в 1дБ  $ДГЗ(мах) = 0,26/V = 0,26T_6$  В этом случае система отказывает. Вероятность отказа  $10^{-6}$  - ( 30с в год) это соответствует 0,33 ДГЗмах. При этом ПМД системы в 1,4-1,5 раз превышает ПМД ОВ. Учитывая эти решения, можно определить требования к ПМД оптических волокон для телекоммуникационных приложений (таблица):

В, Гбит/с	Формат модуляции	ДГЗмах, пс	ПМД системы, пс	ПМД ОВ, пс	Lсистемы, км	КПМД пс/ $\sqrt{км}$
10	NRZ	26	7,5	5,3	100	0,53
10	NRZ	26	7,5	5,3	4000	0,08
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	100	0,13
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	2000	0,03
40	RZ	9,1	2,6	1,9	2000	0,04
40	RZ	4,6	1,3	0,9	1000	0,03

10. Расчеты, выполненные по полученным выражениям данного алгоритма показали отличие коэффициентов ПМД ОВ и коэффициентов ПМД системы в пределах допустимых погрешностей.

11. Сравнение полученных результатов с экспериментальными результатами дает основание утверждать об убедительных подтверждениях полученного алгоритма и методе расчета хроматической и поляризационной модовой дисперсии.

12. Один из методов компенсации ПМД основан на настраиваемом высокоэффективном и селективном пространственном модовом трансформаторе для модулей компенсации дисперсии, обеспечивая преимущество по компенсации дисперсии и наклона ее характеристик во всех применяемых оптических волокнах. При этом достигаются малые потери и высокая толерантность к нелинейным эффектам.

С помощью оптического трансформатора (ОТ) сигнал  $LP_{01}$  моды преобразуются в сигнал  $LP_{11}$  и обратно  $LP_{11}$  в  $LP_{01}$ . В этом случае используются ОВ с высоким двулучепреломлением, в котором межмодовая битовая длина:

$$L_{\sigma} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_{01} - \beta_{11}}$$

где  $\beta_{01}$  и  $\beta_{11}$  постоянные распространения  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  мод [2].

13. Приведенные схемы компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий позволяют скомпенсировать только поляризационную модовую дисперсию с уже скомпенсированным решением по хроматической дисперсии.

14. Для сохранения длины усилительного и регенерационного участка при переходе на более высокие скорости передачи необходимо:

- увеличить выходную мощность,
- уменьшить потери в линии,
- уменьшить шум усилителей,
- докомпенсировать хроматическую дисперсию,
- изменить формат модуляции.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

1. Ранние работы по оценке поляризационной модовой дисперсии не дают точного решения и не позволяют оценить её связь с хроматической дисперсией.
2. Согласно полученным результатам ПМД составляет 9-10 % от значения дисперсии групповых скоростей. Эти решения получили подтверждение в работах Агравала [5, 8, 11].
3. Полученные ранее решения Фримана [45], Убайдуллаева [24, 29, 61] не дают возможности определиться с допустимыми нормами по ПМД при наличии хроматической дисперсии.
4. Работы Каминова [52, 98] предлагают завышенные нормы по ПМД  $(0,15T_6/\text{ПМД})^2$ , тогда как международная электротехническая комиссия (IEC/TR 61282-3-2002) рекомендует норму, поддержанную МСЭ  $(0,1T_6/\text{ПМД})^2$  (МСЭ G.691).
5. Полученные автором решения поддерживают норму МСЭ. Эта норма поддерживается и решениями Агравала.
6. Малое значение ПМД оптического волокна и узкополосные источники позволяют организовать передачу на большие расстояния, исключая влияние ПМД2 и значительно облегчая компенсацию ПМД1.
7. Выбирая систему спектрального уплотнения необходимо правильно выбрать расстояние между каналами, чтобы исключить влияние ПМД1 одного канала на соседние.
8. Учитывая влияние ПМД на задержку сигнала и хроматическую дисперсию, были разработаны современные оптические волокна с малым значением ПМД  $< 0,2 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ . Дисперсионная длина, определяемая в [1] и в диссертации Зелюткова Е.А.[91], должна уменьшиться и, следовательно, для компенсации хроматической дисперсии потребуются большие длины компенсирующего волокна, чем при расчетах дисперсионной длины без учета поляризационной модовой дисперсии.



9. Эти утверждения сказываются при больших скоростях передачи от 40 Гбит/с и при больших длинах усилительных участков от 60-100 км.

10. При скоростях передачи 40-100 Гбит/с следует ориентироваться на оптические волокна G-655 по рекомендации Международного союза электросвязи по телекоммуникациям (МСЭ-Т), так как они обладают меньшим значением хроматической дисперсии, а связь между хроматической дисперсией и ПМД описывается выражением  $\text{ПМД} = x \cdot \sqrt{D}$  или  $\text{ПМД} = \sqrt{x_1 \cdot \beta_2}$

X / ПМД пс/ $\sqrt{\text{км}}$	D пс/нм·км
0,3/ 1,3	18
0,1 / 0,24	6,0
0,05 /0,01	3,0

11. Представленный алгоритм определения хроматической дисперсии в оптическом волокне с учетом скорости передачи системы позволяет определить допустимую длину по дисперсии с учетом форматов модуляции.

12. Полученные решения определяют связь между дисперсионной длиной и Q-фактором, который определяет вероятность ошибки при выборе длины участка регенерации.

13.МСЭ-Т Рекомендации G-691 в определенных случаях допускаются потери на дисперсию до 2дБ, тогда как в большинстве случаев эти потери не должны превышать 1дБ при максимальной вероятности ошибки  $10^{-10}$ , что соответствует значению Q-фактора 6.4 или 16,2дБ.

14. Использование предварительной корректировки ошибки может также увеличить длину участка значительно большую дисперсионной длины при сохранении требуемой вероятности ошибки  $10^{-10}$ .

15. В работе связаны восемь важных параметров: Q-фактор, вероятность ошибки, отношение сигнал/шум (оптический канал), отношение сигнал/шум (электрический канал), длина участка регенерации (усиления), дисперсионная длина и скорость передачи, дисперсионное уширение, поляризационная модовая дисперсия. Дисперсионная длина и скорость передачи определены в работе

Агравала:  $L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2}$ , однако можно более широко обозначить эту длину:

$L_D = \frac{T_a^2}{8\beta_2} = \frac{T_{05}^2}{2,77\beta_2}$  и во всех случаях получаем одну и ту же длину для данной

системы передачи.

Уширение гауссовского импульса определяется выражением:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{T_1 1,665}{T_{05}} = \frac{T_1 2,83}{T_6} = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2}$$

16. Q-фактор определяется выражением  $Q = \frac{T_6^2}{1,85\beta_2 z}$ . В результате:  $Q = \frac{3,42L_D}{z}$ .

Отсюда  $z/L_D = 3,42/Q$ . При скоростях 10 и 40 Гбит/с используются узкополосные источники для этих скоростей существуют ограничения на дисперсионную длину

для различных форматов модуляции:  $\frac{B}{d_M} \sqrt{\beta_2 z} \leq \frac{1}{4}$ , т.е.  $\frac{z}{L_D d_M^2} \leq \frac{1}{2}$ .

17. Коэффициент уширения гауссовского импульса за счет дисперсии

определяется выражением:  $\delta_y = 10 \lg \frac{T_1}{T_0} = 5 \lg \left[ 1 + \left( \frac{1,85}{Q} \right)^2 \right]$ .

19. Эмпирическая формула, приведенная в рекомендации МСЭ G-692 позволяет с учетом полученных решений и допустимых длин принять решение для увеличения длины участка регенерации и усилительных участков за счет введения дополнительного усилителя мощности на выходе после передатчика и предусилителя на входе приемника, а также принять меры по компенсации

дисперсии. Приведенная упрощенная формула полностью совпадает по результатам с эмпирической формулой рекомендации МСЭ-Т.

20. При бинарном формате модуляции для коэффициента битовой ошибки  $10^{-9}$  типовое требуемое значение отношения сигнал/шум для скорости передачи 10 Гбит/с составляет 18 дБ, для скорости 40 Гбит/с -24дБ. Для скорости 100 Гбит/с - 28дБ. Накапливаемый шум ограничивает достижение необходимого расстояния. Пути преодоления влияния шума: уменьшение потерь передачи, уменьшение шума усилителей, увеличение передаваемой мощности, использование рамановских усилителей.

	100Гбит/с; НВО	100Гбит/с; бинарный	100Гбит/с ВО- DQPS К	100Гбит/с 1 – ПОЛЯР- DQPSK 2	40Гбит/с бинарный	10Гбит/с бинарный
Требуемый ОСШ	21дБ	25дБ	18дБ	16дБ	14- 15дБ	8-9дБ
ДГЗ (1дБ)	3пс	3пс	8пс	Большое, когерентность	10пс	40пс
ХД (2дБ0)	8пс/нм	25пс/нм	26пс/нм	Большое, когерентность	50пс/нм	800...2000пс/нм

21. Использование предварительной коррекции ошибки позволяет снизить значение отношения сигнал/шум на 6 дБ. Решение для длины усилительного участка по затуханию для данной скорости передачи позволяет решить задачу по компенсации хроматической дисперсии (с учетом хроматической дисперсии высшего порядка). Зная все значения по всем элементам и их количество, с учетом значения поляризационной дисперсии оптического волокна, определяем значение поляризационной модовой дисперсии на линии. И сравниваем его с

существующими нормами. Зная его возможное превышение относительно существующих норм, уменьшаем длину усилительного участка за счет поляризационной модовой дисперсии и применяем поляризационные компенсаторы дисперсии. Это позволяет уменьшить влияние ПМД на ВОЛС.

Чем больше скорость передачи (40, 100 Гбит/с), тем больше проявляется ПМД. Алгоритм решения задачи по определению ПМД определяется исходными данными:

- выбранным типом оптического волокна (ОВ),
- длиной проектируемой линии,
- системой передачи,
- методом модуляции,
- спектральным уплотнением,
- необходимой предварительной коррекцией ошибок,
- методом компенсации дисперсии.

Результирующая схема линии передачи чаще всего включает кроме промежуточных усилителей мощности еще и предусилитель. Решающим фактором при первоначальном расчете является относительное отношение сигнал/шум (ООСШ) и, следовательно, коэффициент битовых ошибок.

22. Для преодоления негативных воздействий на ООСШ используется предварительная коррекция ошибок (ПКО); для уменьшения влияния ПМД выбирается формат модуляции (RZ-DPSK), для преодоления воздействия хроматической дисперсии используются компенсирующие ОВ или электронная компенсация; нелинейность корректируется с помощью формата модуляции.

Типовое значение ООСШ требуемое для различных скоростей передачи при прямом детектировании при  $10^{-9}$  коэффициенте битовых ошибок приведено в таблице:

Скорость передачи, Гбит/с	2,5	10	40	100
Qэ, треб., дБ	12	18	24	28
Qо , треб	1,414	1,68	2	2,26
Qэ, треб при КБО= $10^{-3}$	4	8	16	26

23. При учете потерь на хроматическую дисперсию до 2 дБ допустимая длина увеличивается по хроматической дисперсии до 51,7 км:

$$L = \frac{0,75 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^2}{\frac{8 \cdot (|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovkd} \cdot L_{ovkd}|)}{(L_{ov} + L_{ovkd})}}$$

Зная длину линии и все элементы без компенсаторов ПМД определим ПМД1 и ПМД2:

$$\text{ПМД1} = 3,7 \cdot \sqrt{N \cdot (\tau_{ov}^2 \cdot L_{ov}^2 + \tau_{ovkd}^2 \cdot L_{ovkd}^2 + \sum \tau_{элементов}^2)}$$

$$\text{ПМД2} = (\text{ПМД1})^2 / \sqrt{3}; \quad (\text{ПМД1})^2 + \text{ПМД2} = \text{ПМД}$$

В результате:

$$L = \frac{0,75 \cdot 0,9 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2}{8,8 \cdot (|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovkd} \cdot L_{ovkd}|) / (L_{ov} + L_{ovkd})}$$

24. Окончательное решение по учёту и компенсации ПМД принимается после предварительного полного расчета и компенсации линии по хроматической

дисперсии. При дифференциальной модовой задержке, равной 0,5Тб коэффициент битовых ошибок (КБО) будет равен  $10^{-3}$ , а при норме 0,1 Тб КБО равен  $10^{-9}$ . Поэтому следует оптимально решить задачу как по компенсации хроматической, так и по поляризационной модовой дисперсии.

ПМД1 переходит в эхо подобный импульс, уширяющийся после детектирования. Уширяющийся импульс распространяется в каждый другой импульс, ухудшая допустимые нормы. Величина допустимых значений зависит от:

- отношения ДГЗ к степени модуляции,
- Отношения разделения импульса в ОВ между двумя поляризациями,
- формата модуляции, типа приемника, характеристик приемника и др.

25. При потерях в 1дБ  $ДГЗ(мах) = 0,26/B = 0,26Тб$  В этом случае система отказывает.

Вероятность отказа  $10^{-6}$  - ( 30с в год) это соответствует 0,33 ДГЗмах. Учитывая эти решения , можно определить требования к ПМД оптических волокон для телекоммуникационных приложений:

В,Гбит/с	Формат модуляции	ДГЗмах пс	ПМД смстемы, пс	ПМД ОВ пс	Lсистемы, км	КПМД Пс/ $\sqrt{км}$
10	NRZ	26	7,5	5,3	100	0,53
10	NRZ	26	7,5	5,3	4000	0,08
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	100	0,13
40	NRZ	6,5	1,9	1,3	2000	0,03

40	RZ	9,1	2,6	1,9	2000	0,04
40	RZ	4,6	1,3	0,9	1000	0,03

26. Расчеты, выполненные по полученным выражениям данного алгоритма, показали отличие коэффициентов ПМД ОВ и коэффициентов ПМД системы в пределах допустимых погрешностей.

27. Один из методов компенсации ПМД основан на настраиваемом высокоэффективном и селективном пространственном модовом трансформаторе для модулей компенсации дисперсии, обеспечивая преимущество по компенсации дисперсии и наклона ее характеристик во всех применяемых оптических волокнах. При этом достигаются малые потери и высокая толерантность к нелинейным эффектам.

С помощью оптического модового трансформатора (ОТ) сигнал  $LP_{01}$  моды преобразуются в сигнал  $LP_{11}$  и обратно  $LP_{11}$  в  $LP_{01}$ . В этом случае используются ОВ с высоким двулучепреломлением, в котором межмодовая битовая длина:

$$L_{\sigma} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_{01} - \beta_{11}}$$

где  $\beta_{01}$  и  $\beta_{11}$  постоянные распространения  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$  мод.

28. Приведенные схемы компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий позволяют скомпенсировать только поляризационную модовую дисперсию с уже скомпенсированным решением по хроматической дисперсии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Гроднев И.И. Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. М.: Радио и связь, 1993. 264 с.
2. Дианов Е.М. Основы волоконно-оптической связи. М.: Сов. Радио, 1980. 232 с.
3. Семенов Н.А. Оптические кабели связи. Теория и расчет. М.: Радио и связь, 1981. 153 с.
4. Мэтвиндер Дж. Волоконные световоды для передачи информации. М.: Радио и связь, 1983. 498 с.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 325 с.
6. Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989. 502 с.
7. Унгер Г. Оптическая связь. М.: Связь, 1979. 435 с.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication systems 2-nd ed. John Willey&Sons inc, 1997. 561 p.
9. Маркузе Д. Оптические волноводы. М.: Мир, 1974. 576 с.
10. Унгер Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 656 с.
11. Agrawal G.P. Applications of nonlinear fiber optics. Academic Press, 2001. 458 p.
12. Okamoto K. Fundamental of optical waveguides. Academic Press, 2000. 428p.
13. Снайдер А., Лав. Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
14. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.:Мир, 1984. 512 с.
15. Kartalopoulos S.V. Introduction to DWDM Technology. N.Y.: IEEE PRESS, 2000. 252 p.
16. Ларин Ю.Т. Оптические кабели. М.: Престиж, 2006. 304 с.
17. Кивштарь К.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. М.: Физматлит, 2005. 648 с.



18. Материалы международного Союза Электросвязи МСЭ-Т G-955, G-652, G-655, G-656.
19. Былянски П., Ингрэм Д. Цифровые системы передачи. Пер. с англ. Языка под ред. Визеля А.А. М.: Связь, 1980. 380 с.
20. Рогачев Д.В., Бондаренко О.В., Дашенко А.Ф., Усов А.В. Волоконно-оптические кабели. Одесса.: Астропринт, 2000. 536 с.
21. Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и новые перспективы. Под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: Техносфера 2010. 608 с.
22. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: Syrus Systems, 1999. 627 с.
23. ITU-T Recommendation G.663 – Application related aspects of optical fiber devices and sub-systems (04.00)
24. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001. 267 с.
25. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre-cable
26. ITU-T Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre-cable (04.97)
27. ITU-T Recommendation G.655. Characteristics of non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre cable (10.96)
28. ITU-T Recommendation G.662. Generic characteristics of optical fibre amplifier devices and subsystems (10.98)
29. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA// Lightwave RE. №1. 2003. С. 22-28.
30. Buck J.A. Fundamentals of optical fibers. New-York: John Willey, 1995. 352 p.
31. TIA/EIA FOTP-169. Chromatic dispersion measurement of single-mode optical fibers by the phase shift method. Washington D.C. Telecommunications Industry Association, 1992

32. TIA/EIA FOTP-175. Chromatic dispersion measurement of single mode optical fibers by the differential phase shift method. Washington DC. Telecommunications Industry Association, 1992
33. Четкин С.В. Межсимвольная помеха в оптических системах передачи. Учебное пособие. М.: МТУСИ, 2004. 47 с.
34. Poole C.D., Wiesenfield J.M., DiGiovanni D.J., Vengaskar A.M.. Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff.// IEEE. Journal of Lightwave Technology. V.12 №10, 1994. P.1746.
35. Скляр О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. М.: Солон-Р, 2001. 237 с.
36. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели. Основы. Проектирование кабелей. Планирование систем. Новосибирск: Лингва-9, 1997. 340 с.
37. Пешков И.Б. Кабели связи и перспективы их развития. Связь в России в 21 веке. М.: МАС, 1999.
38. Волоконно-оптическая техника. История, достижения, перспективы (сборник статей) под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. М.: Connect, 2000. 376 с.
39. R.Ramaswami, K.N. Sivarijan. Optical Networks. A practical perspective. Morgan Kaufmann publishers inc. San Francisco California, 1998.
40. Glass A.M., DiGiovanni D.J., Strasser Th.A. Advances in fiber optics // Bell Labs technical Journal – January/March -1999
41. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: Лесарарт, 2003. 288 с.
42. ITU-T Recommendation G.692. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers (10.98)
43. ITU-T Recommendation G.957. Optical Interfaces for equipments and system relating to the synchronous digital hierarchy (06.99)
44. Стерлинг Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. Пер. с англ. А. Московченко. М.: Лори, 1998. 195 с.

45. Freeman R.L. Fundamentals of telecommunications. Published by John Wiley & Sons, Inc, hoboken, New Jersey, 2005. 649 p.
46. ITU-T Recommendation G.694.2 Spectral Grids for WDM applications – CWDM-wavelength grid (06.02)
47. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral Grids for WDM applications. DWDM wavelength grid (06.02)
48. Глаголев С.В. Особенности проектирования современных высокоскоростных волоконно-оптических линий связи. Спецвыпуск Фотон-Экспресс, Наука 2006. №6 с.28-38.
49. Фриман Р.Л. Волоконно-оптические системы связи. Перевод с англ. Под редакцией Слепова Н.Н. М.: Техносфера, 2003. 440 с.
50. D.K. Munbaev, L.L. Scheiner. Fiber Optic Communications Technology. Prentice Hall, 2001.
51. A.E. Willner. Chromatic Dispersion and polarization-mode dispersion.//OPN Trends. S-16. march 2002.
52. I.P. Kaminov and T.L. Koch Optical Fiber telecommunications. Academic Press, New York, 1997.
53. Barlow A.J. Chromatic Dispersion tolerance gets tighter. Perkin Elmer Optoelectronics. Web explosive, september 5, 2002.
54. Наний О.Е. Основы цифровых волоконно-оптических систем связи // Lightwave RE 2003 №1 с. 48-51.
55. Grunter-Neilsen L., Edvond B. Status and future promises for dispersion compensating fibers. Proc. European Conference on Optical Communications, ECOC-2002, Copengagen, Denmark, sep.2002.
56. Sakamoto A. et al Novel Fabrication method for dispersion compensating grating utilizing excimer lamp (172nm) and iniform phase mask. ECOC-IOOC 2003 Proc. Vol.1. Rimini, 2003.
57. Kapron F.P., Keck D.E. Pulse transmission through a dielectric optical waveguide. Applied Optics, v.10 №7 1971.

58. Alan E. Willner. Chromatic and polarization-mode dispersion. Managing key limitations in optical communication systems // OPN TRENTS, March, 2003, S-1 – S21
59. Lois-Anne de Montmorion, A.Bertainam P.Sillard, L.Fleury and other optimized fiber for terabit transmission. International wire & cable Symposium Proceedings of the 49th.
60. Joseph M.Kahn, Keang-Po Ho. Spectral efficiency limits and modulation-detection techniques for DWDM systems // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. V.10 №2, March/April 2004
61. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. пер. с англ. яз. Под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева , А.В. Шмалько М.: EXFO, 2001. 252 с.
62. ITU-T Recommendation G.821. Error performance of an international digital connection operating at bit rate the primary rate and forming part of integrated services digital network (08.96).
63. ITU-T recommendation G.826. Error performance parameters and objectives for international m constant bit rate digital paths at or above the primary rate (08.96).
64. ITU-T Recommendation M.2100. Performance limits for bringing-into-service and maintenance of international PDH paths, sections and transmission systems (07.95).
65. Вербовецкий А.А. основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи. М.: Радио и Связь, 2000. 275 с.
66. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 368 с.
67. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000. 468 с.
68. Comparison of pre-,post- and symmetrical dispersion compensation schemes rof Gbit/s NRZ links using dispersion compensated fibers // IE(I) Journal – ET, vol.85, July, 2004.

69. R.S. Luis, A.V.T. Cartaxo. Analytical characterization of SPM impact on XPM induced degradation in dispersion-compensated WDM-systems // Journal of Lightwave technology v23 №3 March 2005.
70. Величко М.А. Электронные методы компенсации дисперсии в оптических линиях связи // Lightwave RE 2007 №1 с 20-23.
71. Y.R. Zhou, A. Lord, E.S.R. Sikova. Ultra-Long Haul WDM Transmission systems // BT technology Journal v.20 №4 Oct.2002.
72. Ozan K.Tonguz, Felton A. Flood. Gain equalization of EDFA's cascades // Journal of lightwave technology v.15. №10 Oct.1997.
73. Ragini Tripathi, Nar Singh. Design considerations in ultra high speed long-haul WDM-link. International conference on next generation communication systems ICON GENCON – 06. 180-185p.
74. R. Hui, Y.Wang, K.Demarest, C.Alden. Frequency response of cross-phase modulation in multispan WDM optical fiber systems // IEEE Photonics technology letters. V.10 №9. September 1998.
75. D. Marcuse, C.R. Menyk. Simulation of single-channel optical systems at 10 Gbit/s // Journal of Lightwave Technology. V.17 №4. April 1999. C. 564-569.
76. John D.Downie. Relationship of Q-penalty to eye-closure penalty for NRZ and RZ signals with signal-dependent noise // Journal of Lightwave technology. V.23, №6, June 2005.
77. Q. Lin, Govind P. Agrawal. Effects of polarisation-mode dispersion on cross-phase modulation in dispersion-managed wavelength-division-multiplexed systems. Journal of Lightwave Technology, v.22 №4 April, 2004.
78. H.J. Thiele, R.I. Killey, P. Bayvel. Transmission limitations in optical WDM networks due to cross-phase modulation. The Institution of Electrical Engineering.
79. Величко М.А., Наний О.Е., Сусьян А.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи // М.:Lightwave RE, №4, 2005. С.21-30.
80. Eduard Sackinger. Broadband circuits for optical fiber communication. Published by John Willey & Sons inc. Hoboken, New Jersey, 2005.

81. ITU-T Recommendation G.976. Test methods applicable to optical fibre submarine cable (04.97)
82. Стариков Н.С. Q-фактор: новый подход к анализу качества цифровых систем передачи. Метрология и измерительная техника в связи. 2002. №5 стр.17-18
83. ITU-T Recommendation G.975. Forward error correction for submarine systems (11.96)
84. Рекомендация МСЭ-Т G.691 Оптические стыки для одноканальных STM-64 и STM-256 и других систем СЦИ с оптическими усилителями.
85. Портнов Э.Л., Кроп А.Я., Зелютков Е.А. Влияние поляризационной модовой дисперсии на передачу сигнала, Материалы второй отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества», МТУСИ, ЦНИИС, 13-15 февраля 2008г.
86. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 462 с.
87. Портнов Э.Л., Зелютков Е.А. Температурная зависимость двулучепреломления в оптическом волокне оптического кабеля, Материалы второй отраслевой научной конференции «Технологии Информационного Общества», МТУСИ, ЦНИИС, 13-15 февраля 2008г.
88. Портнов Э.Л., Зелютков Е.А. Решения, связанные с определением хроматической дисперсии в одномодовом оптическом волокне, Журнал T-Comm, Спецвыпуск по информационной безопасности, 2008г.
89. Зелютков Е.А. О дисперсионной длине и отношении сигнал/шум, Журнал T-Comm, №5, 2008г.
90. Портнов Э.Л., Зелютков Е.А. Что определяют дисперсионная и нелинейная длины оптического волокна, Журнал T-Comm, №4, 2008 г.
91. Зелютков Е.А. Влияние хроматической дисперсии при выборе оптимальной длины регенерационного участка на волоконно-оптической линии связи. Диссертационная работа, Москва 2009.

92. Зелютков Е.А. Одна из методик внедрения систем спектрального уплотнения на действующих линиях связи ВОЛС железнодорожного транспорта, Журнал Т-Comm, Спецвыпуск по информационным технологиям на транспорте, 2008г.
93. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 544 с.
94. Портнов Э.Л. Оптические кабели их монтаж и измерение. М.: Горячая линия –Телеком, 2012. 448 с.
95. F.Matera, M.Settembre, M.Tamburrini, F.Favre, D.LtQuen, T.George, M.Htnre, G.Mi chaud, P.Franco, A.Schiffini, M.Ramagnoli, M.Gugliebmucci, S.Cascelli Field demjnstranijn of 40 GBit/s solitjn Nransmission. Journal of Lightwave Technology v.17,# 11,1999 pp/2225-2234.
96. Портнов Э. Л. Оптические кабели и пассивные компоненты линий связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 464 с.
97. A. Othonos and K. Kalli Fiber Bragg grating Fundamentals and applications in telecommunications and sensing Artech House, Norwood, MA, 1999. 419 p.
98. C.R.Menyuk, A.Galtarossa Polarization mode dispersion, Springer, 2005, 298p.
99. I.Kaminow, T.L.Koch Optical fiber telecommunication, 3A, Academic press, 2002. 798 p.
100. Григорьян А.К. К методике расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии. Шестая отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества» 14-15 февраля 2012. с. 111.
101. Григорьян А.К. Портнов Э.Л. Увеличение длины усилительного участка за счет предварительной коррекции ошибки при высоких скоростях передачи, НТК МТУСИ 09.02.2011.
102. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Компенсация хроматической дисперсии с помощью устройств с расширением оптического луча // Шестая отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества» 14-15 февраля 2012. С.111.

103. Григорьян А.К. Влияние дисперсионной длины и поляризационной модовой дисперсии на определение допустимой длины усилительного участка // Т-Comm – телекоммуникации и транспорт. 2012. №4. С. 46-47.
104. Григорьян А.К. Упреждающая коррекция ошибки при скоростях передачи 10-100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ и CRZ // Т-Comm – телекоммуникации и транспорт. 2012. №1. С. 53-54.
105. Григорьян А.К. Оценка методики расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии // Электросвязь. 2012. №12, С. 28-30.
106. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2485559 «ТРЕХКАМЕРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ» Опубликовано 20.06.2013. Бюл.№17
107. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2488184 «ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ С ОТКРЫТЫМ МОДУЛЕМ» Опубликовано 20.07.2013. Бюл.№20
108. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2485560 «ЧЕТЫРЕХКАМЕРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ» Опубликовано 20.06.2013. Бюл.№17
109. Григорьян А.К. Алгоритмическая методика определения поляризационной модовой дисперсии на волоконно-оптической линии связи / Григорьян А.К. Портнов Э.Л., // Т-Comm/.№8-2013, С.99-101.
110. Григорьян А.К., Портнов Э.Л., Кочемасов Д.В. Новые технические решения по соединителям волоконной оптики // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт №1-2012,С.27-32
111. Григорьян А.К. Влияние дисперсионной длины и поляризационной модовой дисперсии на определение допустимой длины усилительного участка //Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт №4-2012,С. 46-47.
112. Портнов Э.Л., Григорьян А.К. Упреждающая коррекция ошибки при скоростях передачи 10-100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ и CRZ // РНТОРЭС им. А.С. Попова. Научная сессия, посвященная дню радио. LXVI. Москва 2011. С. 111-113.



113. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Оценка допустимых норм по хроматической и поляризационно-модовой дисперсиям // МАИ Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2011. С. 99-103.
114. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Ограничения по применению современных оптических волокон в будущем // МАИ Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2010. С. 152-153.
115. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Ускоренное решение по определению вероятности ошибки в волоконно-оптической линии передачи // МАИ Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2010. С. 154-156.
116. Григорьян А.К. О зависимости хроматической и поляризационной модовой дисперсий от длины волны // МАИ Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2013. С. 82-86.
117. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. О времени нарастания фронтов импульсов и накопленная дисперсия в оптическом канале системы передачи // НТК МТУСИ-2011.
118. Григорьян А.К. Портнов Э.Л. Как определить требуемую длину оптического волокна для компенсации дисперсии // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2012» М., МИРЭА, декабрь 2012г., часть 4.
119. Григорьян А.К. Один из методов компенсации хроматической дисперсии с помощью устройств с расширением оптического луча // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2012» М., МИРЭА, декабрь 2012г., часть 6 с.64-66.
120. Григорьян А.К. Портнов Э.Л. Определение поляризационной модовой дисперсии на волоконно-оптической линии передачи // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2013», М., МИРЭА, декабрь 2013.
121. Григорьян А.К., Когда проявляется поляризационная модовая дисперсия // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2014

Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 201. С. 79-81.

122. Портнов Э.Л., Григорьян А.К., Поляризация модовая дисперсия на волоконно-оптической линии передачи // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2014. №9. С.62-65;