

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена на кафедре направляющие телекоммуникационные среды в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Московский технический университет связи и информатики» (ФГОБУ ВПО «МТУСИ»).

Научный руководитель: **Портнов Эдуард Львович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Боев Михаил Андреевич**

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

**Зелютков Евгений Александрович**

кандидат технических наук, руководитель

службы проектирования, ОАО «Вымпелком»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие

"Центральный научно-исследовательский институт связи"

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д219.001.03 при МТУСИ по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная д.8а, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОБУ ВПО МТУСИ, с авторефератом - на сайте ВУЗа <http://www.mtuci.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года

Ученый секретарь

совета по защите докторских и

кандидатских диссертаций Д 219.001.03

кандидат технических наук, доцент

\_\_\_\_\_ С.Д. Ерохин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 волоконно-оптической системы передачи (ВОСП-СП) 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) Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) и новых современных конструкций волоконно-оптических кабелей (ВОК). Однако, уже созданная транспортная сеть была ориентирована на дешевые ОВ по рекомендации 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 пс/√км) при высоких скоростях передачи (выше 10 Гбит/с).

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

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

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 модовая дисперсия (ПМД) начинает оказывать неприятные воздействия на характеристики передачи и выбор длины усилительного и регенерационного участка при скоростях 10 и 40 Гбит/с и выше. ПМД является средней величиной дифференциальной групповой задержки (ДГЗ), 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.

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.

#### **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 (ХД), 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.

#### **Степень разработанности**

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 Фриману 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 –  $0,1 T_b$ , где  $T_b$  битовый интервал, пс;  $V=1/T_b$  скорость передачи Гбит/с.

Влияние ПМД на ВОСП-СР возрастает:

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

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

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  $0,1 T_b$ . 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).

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.

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 демультимплексоры, компенсаторы дисперсии и т.д., которые вносят свой вклад в увеличение значения ПМД на действующей линии.

Системы передачи со спектральным уплотнением являются основным средством создания полностью оптических транспортных сетей. Шаг оптических несущих частот регламентирован в рекомендации МСЭ-Т G.692

В отечественной практике разработано ряд методик для определения длин регенерационных участков, которые не полностью соответствуют предъявляемым требованиям:

- не учтены решения по современным форматам модуляции при расчете дисперсионных параметров (хроматической дисперсии (ХД) и ПМД);
- не учтены решения по современным форматам модуляции с учетом упреждающей 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 диссертационной работы является разработка современной методики расчета параметров ВОЛС с учетом хроматической дисперсии, ПМД первого порядка, с учетом формата модуляции, упреждающей коррекции ошибки и вероятности ошибки для систем передачи при скоростях передачи 40-100 Гбит/с с учетом ВОСП-СП.

#### **Цель работы и задачи диссертации**

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

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 упреждающей коррекции ошибок с применением современных кодов с учетом ХД и ПМД.

**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, упреждающей коррекции ошибки и отношения сигнал/шум в оптическом канале;
- получены новые решения для определения отношения сигнал/шум и коэффициента битовых ошибок для указанных выше задач;
- разработана уточненная методика расчета длины регенерационного участка с учетом избыточности усиления с применением современных кодов для управления дисперсией на ВОСП-СР;
- получены 3 патента на конструкцию ВОК, позволяющие оптимально и в короткий срок устранить повреждения на волоконно-оптической линии связи.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Основные результаты исследований, рекомендации по методикам расчета хроматической дисперсии 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.

#### **Методы исследований**

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

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

- Современная алгоритмическая методика позволяющая рассчитать длины усилительного и регенерационного участка при влиянии хроматической дисперсии и ПМД с учетом современных форматов модуляции, упреждающей 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.

### Апробация результатов работы

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

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

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

Основные результаты диссертационной работы представлены в 19 печатных трудах и трех патентах на изобретение.

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

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.

Доказано, что простые решения по уширению импульса, связанные с дисперсионной длиной однозначно согласуются с результатами, полученными Агравалом. Кроме того, эти решения связаны с Q-фактором, который определяет отношение сигнал/шум в оптическом канале.

Воспользовавшись уравнением, получим:

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

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:

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

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

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

$n_2$  - нелинейный коэффициент преломления (принятый  $2,6 \cdot 10^{-16} \frac{\text{с.М}}{\text{Вт}}$   $\lambda$  -

длина волны;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\omega_0$  - угловая частота;

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

$$L_d = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (3)$$

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

$$L_{\text{нл}} = \frac{1}{\gamma \cdot P_0} \quad (4)$$

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

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

Решения приведенного уравнения по распространению импульса в ОВ осуществляется отдельно для дисперсии и нелинейных явлений. Соотношение между длинами ОВ,  $L$ ,  $L_d$ ,  $L_{\text{нл}}$  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. 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  $10^{-10}$ .

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

$$T_1 = T_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2} \quad (5)$$

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  $L_{\text{нл}} \gg L_{\text{д}}$  и преобладающее значение имеет дисперсия. 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  $T_1/T_0 = 1,6$

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

$$b_{\text{уи}} = 10 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{8 \cdot \beta_2 \cdot B^2 \cdot L}{d_{\text{м}}^2} \right)^2} \quad (6)$$

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

$$b_{\text{ши}} = 10 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{d_{\text{м}}}{4 \cdot B \cdot D \cdot \Delta\lambda \cdot L} \right)^2} \quad (7)$$

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

По аналогии с технологией дисперсии групповых скоростей введено понятие поляризационной длины:

$$L_{\text{ПМД}} = \left( x \frac{T_0}{D_p} \right)^2 \quad (8)$$

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

Спектральную зависимость ПМД вектора можно представить в форме ряда Тейлора:

$$\tau(\omega, z) = \tau(\omega_0, z) + (\omega - \omega_0) \cdot \tau_1(\omega_0, z) + \frac{1}{2} \cdot (\omega - \omega_0)^2 \cdot \tau_2(\omega_0, z) + \dots \quad (9)$$

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.

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 одного 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:

$$P_{\text{простоя}} = K \cdot N \cdot R \quad (10)$$

$$\text{где } 2 > R > 1$$

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

$$l_D = \frac{1}{(\text{ПМД} \cdot \Delta\lambda)^2} \quad (11)$$

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:

Согласно МСЭ-Т (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:

$$\text{ПМД}_{\text{системы}} = \sqrt{\frac{\text{ПМД}_Q^2 \cdot l_1 + n_1 \cdot \text{ПМД}_y^2 + n_3 \cdot \text{ПМД}_K^2}{l}}, \text{ где } l_1 < l \quad (12)$$

$l_1$  – длина кабеля

$l = l_1 + n \cdot l_K$  – общая длина линии с учетом компенсаторов дисперсии

$$\text{ПМД}_{\text{системы}} = 0,1 \cdot T \quad (13)$$

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:

$$\text{ПМД2} \cong \frac{(\text{ПМД1})^2}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

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.

Согласно Фриману[45] поляризационная модовая дисперсия вызывает межсимвольную интерференцию. Оценка этого явления – ухудшение показателей системы примерно на 1 дБ с учетом хроматической дисперсии при 0,3Т<sub>б</sub>, а в худшем случае и при 0,4Т<sub>б</sub>. Доля ПМД составляет 0,1Т<sub>б</sub>. Компьютерное моделирование показывает, что если ПМД имеет Максвелловское распределение со средним значением не выше 0,1Т<sub>б</sub>, то с вероятностью меньшей, чем 10<sup>-9</sup> ухудшение показателей системы не превысит 1дБ. Суммарная дисперсия: хроматическая и поляризационная модовая дисперсия – могут составлять 0,4Т<sub>б</sub>, тогда как ПМД составляет 0,1 Т<sub>б</sub>. Если исходить из этих соображений  $D_{хд} = 0,3873 \text{ Т}_б$ . Это соответствует решению:

$\frac{T_1}{T_0} = 1,387 \cdot T_0$  при  $L/L_0 = 0,9616$ , с учетом ПМД  $L/L_0 = 0,98$ ,  $\sigma = T_0 \sqrt{0,25^2 + 0,1^2} = 0,269 \cdot T_0 = 0,76 \cdot T_0$  в этом случае  $\frac{T_1}{T_0} = 1,256 - 1 \text{ дБ}$

Согласно решениям Убадуллаева:

Дисперсия определяется  $D = \sqrt{D_{\text{мод}}^2 + (D(\lambda) \cdot \Delta\lambda)^2}$ , удельная полоса пропускания  $W=0,44/D$

Так у рассматриваемого автора: ПМД =  $0,5 \cdot \sqrt{D_{\text{хд}, \text{нс}}}$

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

$$L_{\text{нмд}} = 0,02 \cdot \frac{T_0^2}{\text{ПМД}^2} = (0,141 \cdot T_0 / \text{ПМД})^2$$

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

Агравалом получено выражение для допустимого изменения гауссовского импульса по ПМД:

$$\sigma^2(\text{нмд}) = \frac{1}{4} \cdot \left( \sqrt{\Delta\tau^2(\text{нмд}) - T_0^2 \cdot \frac{(1 + 2 \cdot \Delta\tau^2(\text{нмд}))}{3 \cdot T_0^2}} - 1 \right) \quad (15)$$

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

Здесь  $\Delta\tau(\text{пмд})$  – среднее значение ПМД пс,  $T_0$  – полуширина гауссовского импульса по уровню  $1/e$ , пс,  $\Delta\tau(\text{нмд}) = T_0$ . В результате получаем  $\sigma(\text{пмд}) = 0,145T_0$ .

$$L_{\text{max}} = \left( \frac{\tau_{\text{max}}}{\text{ПМД}} \right)^2 \quad (16)$$

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

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

$$\text{Второй} - 0,15 \cdot T_0 \text{ (Каминов, Агравал)} \quad \tau_{\text{max}} = \sqrt{(0,25 \cdot T_0)^2 + (0,15 \cdot T_0)^2} = 0,3 \cdot T_0$$

При распределении векторных составляющих ПМД используется гауссовское распределение, а при распределении плотности распределения дифференциальной групповой задержки – Максвелловское распределение.

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  $\Delta\lambda$ . Определив с высокой точностью для гауссовской формы импульсов, их параметры, в

частности  $T_0$  (по Агравалу), пренебрегая нелинейными эффектами, получим во второй главе результирующее значение на любой длине ОВ с учетом формата модуляции.

В **третьей главе** рассмотрены методики расчетов компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий, упреждающая коррекция ошибок при скорости передачи 10- 100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ, CRZ. Показано воздействие УКО на выбор длины УУ с учетом хроматической и поляризационной модовой дисперсий и на отношение сигнал/шум. Рассмотрена известная методика компенсации ХД и её воздействие на величину ПМД при различных схемах компенсации ХД. Предложена схема компенсации ХД и ПМД с помощью модового трансформатора путем преобразования основной волны LP01 в волну LP02 и обратно.

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  $Q_0=1,49$ .

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

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

$$Q_0 = \frac{T_0 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot L_\alpha}} \quad (17)$$

без учета поляризационной модовой дисперсии.

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

$$Q_{0x} = \frac{T_0 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M}{2 \cdot \sqrt{\beta_2 \cdot L_\alpha}} \quad (18)$$

В результате  $Q_{0x}/Q_0 > 1$

На основании этих решений определим новое значение дисперсионной длины:

$$L_d = \frac{T_0^2 \cdot (d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q_{0x}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (19)$$

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

$$L = \frac{0,75 \cdot T_0^2 \cdot (d_m \cdot 3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q_{0x}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (20)$$

В результате допускается уширение передаваемого импульса при первом поколении упреждающей коррекции ошибки:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \frac{3,42}{Q_3}} = 1,453, \text{ т.е. можно допустить уширение импульса, равное } 1,453$$

вместо 1,25 и допустимые потери вырастут до 1,62 дБ вместо 1 дБ. При втором поколении упреждающей коррекции ошибки уже  $\frac{T_1}{T_0} = 1,584$ , т.е. допустимые потери вырастут до 2дБ.

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:

$$17,3 - Q_0 + 10 \cdot \lg R, R < 1$$

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:

$$l = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2 \cdot (1 + C^2)}{(1,85 \cdot Q_0^2)^2 \cdot \beta_2} \quad (21)$$

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. дисперсии при Если норму увеличить до  $0,3T_6$ , то допустимые значения длин, увеличатся в 9 раз. Более целесообразный путь увеличить норму для ПМД до  $0,15T_6$ .

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

$$L_d = \frac{T_0^2 \cdot d_m}{8 \cdot (1 + x)\beta_2}, \text{ где } x = \frac{D_{\text{пмд}} \cdot \lambda^2}{\beta_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot c} \quad (22)$$

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 км без ПМД для скорости передачи 10 Гбит/с и формата модуляции NRZ.

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

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

Определим дисперсионную длину с учетом квадратурно-фазовой модуляции с невозвратом к нулю (НВО) и упреждающей коррекции ошибки первого поколения (УКО):

$$L_d = T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2 / 8 \cdot \beta_2 \quad (23)$$

Получим  $L_d = 41 \text{ км}$ , при потерях на хроматическую дисперсию 1 дБ допустимая длина по дисперсии в этом случае будет равна 31 км. Следовательно, для компенсации дисперсии следует использовать 34 км дисперсионного волокна. В этом случае:

$$L = 0,75 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2 / 8 \cdot (\beta_{2\text{ов}} \cdot L_{\text{ов}} + \beta_{2\text{овкд}} \cdot L_{\text{овкд}}) / (L_{\text{ов}} + L_{\text{овкд}}) \quad (24)$$

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:

$$\text{ПМД1} = 3,5 \cdot \sqrt{N \cdot (\tau_{\text{ов}}^2 \cdot L_{\text{ов}}^2 + \tau_{\text{овкд}}^2 \cdot L_{\text{овкд}}^2 + \sum \tau_{\text{элементов}}^2)} \quad (25)$$

$$ПМД2 = (ПМД1)^2 / \sqrt{3}; \quad (26)$$

$$(ПМД1)^2 + ПМД2 = ПМД \quad (27)$$

В результате:

$$L = \frac{0,75 \cdot 0,9 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2}{8,8 \cdot (\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovkd} \cdot L_{ovkd}) / (L_{ov} + L_{ovkd})} \quad (28)$$

Увеличивая длину и число компенсирующих модулей на ВОЛП, мы увеличиваем ПМД. Один из методов компенсации ХД и 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<sub>01</sub> моды преобразуются в сигнал LP<sub>11</sub> и обратно LP<sub>11</sub> в LP<sub>01</sub>. В этом случае используются ОВ с высоким двулучепреломлением.

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 9-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, типа метода модуляции и типа ОВ с учетом упреждающей коррекции ошибок), позволяет, в зависимости от характеристик передатчиков и приемников системы передачи и системы ВОСП-СР, оптимально выбрать допустимую длину участка регенерации и усиления.

1. Исходным положением при разработке алгоритмической методики является, длина магистрали Р2Р, 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<sup>-9</sup>.

Зная требования по хроматической дисперсии определим допустимую длину при потерях на дисперсию в пределах 1,5 дБ:

$$l_d = \frac{T_b^2 \cdot d_m^2}{8 \cdot |\beta_2|}, \text{ км} \quad (29)$$

где  $T_b$  - битовый период для формата модуляции NRZ, который учитывается в модуляционном параметре  $d_m=1$ .

$\beta_2$  – дисперсия групповых скоростей, пс<sup>2</sup>/км.

$l_d$  – может быть определена другим путем:

$$l_d = \frac{T_b \cdot d_m}{4 \cdot D \cdot \Delta\lambda}, \text{ км} \quad (30)$$

где D – параметр хроматической дисперсии, пс/нм·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  $\text{пс}/\sqrt{\text{км}}$ ). Вместе с тем, значение ПМД и допустимая длина, при которой потери не превышают 1 дБ, описывается выражением:

$$l_{\text{пмд}} = \left( \frac{0,1 \cdot T_0}{\text{ПМД}} \right)^2 \quad (31)$$

где ПМД – коэффициент ПМД,  $\text{пс}/\sqrt{\text{км}}$ . Для ОВ он задается в характеристиках.

Однако, при длине линии, превышающей усилительный участок  $l_a$  в несколько раз, следует учитывать наличие усилительных элементов на линии, а при  $l_a > l_0$  следует учитывать и наличие элементов для компенсации дисперсии.

В результате  $\text{ПМД}_{\text{ов}} < \text{ПМД}_{\text{л}}$  для рассматриваемой системы передачи. Расчеты, приведенные в [11], приведены в таблице 4.3.

Потери мощности при раскрые глаз-диаграммы при формате модуляции NRZ определяется выражением (за счет дифференциальной групповой задержки):

$$P = 1 \text{ дБ} = 15 \cdot (\text{ДГЗ} \cdot B)^2, \text{ дБ}$$

При потерях в 1 дБ  $\text{ДГЗ}(\text{max}) = 0,26/B = 0,26 \cdot T_0$ . 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

Расчеты, выполненные по полученным выражениям данного алгоритма показали отличие коэффициентов ПМД ОВ и коэффициентов ПМД системы в  $\sqrt{2}$  раз.

Следующим шагом является определение отношения сигнал/шум для данной линии и системы передачи.

Требуемая величина оптического отношения сигнал/шум составляет 18 дБ при формате модуляции «включено-выключено» при коэффициенте битовых ошибок (КБО)  $10^{-9}$  при скорости передачи (B) 10 Гбит/с. 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.

Для преодоления негативных воздействий на ООСШ используется упреждающая 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.

Для одного пролета и одного канала данное эмпирическое выражение будет иметь вид для длины волны 1550 нм с учетом первого поколения предварительной коррекции ошибки:

$$\text{ОСШ} - 6 \text{ дБ} = 58 + P_{\text{вых}} - \alpha L - NF - k \quad (32)$$

При применении различных форматов модуляции и упреждающей коррекции ошибки необходимо учитывать влияние ПМД на дисперсионную длину и С 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 параметра:

- дисперсионная длина и допустимая длина;

- допуск на потери по хроматической и поляризационной модой дисперсии;
- отношение сигнал/шум системы передачи;

**Первый этап.**

$$L_{\partial} = \frac{T_{\delta}^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (33)$$

**Второй этап.**

Второй этап учитывает применение FEC (упреждающей коррекции ошибки)  $Q_{\text{ЭFEC}} = 8$ ;  $Q_{\text{Э}} = 16$  при 40 Гбит/с.

$$L_{g1} = \frac{T_{\delta}^2 \cdot d_M^2 \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{\text{Э}}}{Q_{\text{ЭFEC}}}\right)^2}{8 \cdot |\beta_2|} \quad (34)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,75 \cdot L_{g1}}{L_{g1}}\right)^2} \quad (35)$$

$$Q_{01} = \frac{T_{\delta} \cdot d_M \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{\text{Э}}}{Q_{\text{ЭFEC}}}\right)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2| \cdot l_{\alpha}}} \quad (36)$$

**Третий этап.**

$$L_{g1} = \frac{T_{\delta}^2 \cdot d_M^2 \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{\text{Э}}}{Q_{\text{ЭFEC}}}\right)^2}{8 \cdot \left(\frac{|\beta_2 \cdot l_1 + \beta_{2k} \cdot l_k|}{l_{\alpha}}\right)} \quad (37)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,75 \cdot L_{g2}}{L_{g2}}\right)^2} \quad (38)$$

$$Q_{02} = \frac{T_{\delta} \cdot d_M \cdot (3,33 \cdot \lg(M = 4))^2 \cdot \left(\frac{Q_{\text{Э}}}{Q_{\text{ЭFEC}}}\right)}{2 \cdot \sqrt{|\beta_2 \cdot l_1 + \beta_{2k} \cdot l_k|}} \quad (39)$$

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:

$$L_{\alpha \text{don}} = \frac{0,75 \cdot T_{\delta}^2 \cdot d_M^2}{8 \cdot \frac{(|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovk\partial} \cdot L_{ovk\partial}|)}{(L_{ov} + L_{ovk\partial})}} \quad (40)$$

Воспользовавшись данным выражением, определим необходимую длину оптического волокна для компенсации дисперсии при минимальных потерях в пределах 1 дБ:

$$L_{\alpha \text{don}} = \frac{0,75 \cdot T_{\delta}^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{FEC}}}\right)^2}{8 \cdot \frac{(|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovk\partial} \cdot L_{ovk\partial}|)}{(L_{ov} + L_{ovk\partial})}} \quad (41)$$

$$8 \cdot (|\beta_{2ov} \cdot L_{ov} + \beta_{2ovk\partial} \cdot L_{ovk\partial}|) = 0,75 \cdot T_{\delta}^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{FEC}}}\right)^2 \quad (42)$$

$$8 \cdot \beta_{2ovk\partial} \cdot L_{ovk\partial} = 0,75 \cdot T_{\delta}^2 \cdot d_M^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{\text{FEC}}}\right)^2 - 8 \cdot |\beta_{2ov}| \cdot L_{ov} \quad (43)$$

$$L_{овкд} = \frac{0,75 \cdot T_6^2 \cdot d_m^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2 - 8 \cdot |\beta_{2ов}| \cdot L_{ов}}{8 \cdot \beta_{2овкд}} \quad (44)$$

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:

$$ПМД1 = 3,5 \cdot \sqrt{N \cdot (\tau_{ов}^2 \cdot L_{ов}^2 + \tau_{овкд}^2 \cdot L_{овкд}^2 + \sum \tau_{элементов}^2)} \quad (45)$$

$$ПМД2 = (ПМД1)^2 / \sqrt{3}; \quad (46)$$

$$(ПМД1)^2 + ПМД2 = ПМД \quad (47)$$

В результате:

$$L = \frac{0,75 \cdot 0,9 \cdot T_b^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M)^2 \cdot (Q_1/Q_0)^2}{8,8 \cdot (|\beta_{2ов} \cdot L_{ов} + \beta_{2овкд} \cdot L_{овкд}|) / (L_{ов} + L_{овкд})} \quad (48)$$

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.

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.**

$$L_{оз} = \frac{T_6^2 \cdot d_m^2 \cdot (3,33 \cdot \lg M = 4)^2 \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_{FEC}}\right)^2}{8 \cdot \left[ \frac{|\beta_2 \cdot l_2 + \beta_{2к} \cdot l_k|}{l_\alpha} + ПМД^2 \right]} \quad (49)$$

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).

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  $L/L_{нмд}$ , где  $L$  длина ОВ, а  $L_{нмд} = \frac{T_6^2}{2 \cdot D_{нмд}^2}$ .

Это отношение не должно быть больше 4 ( $\frac{L}{L_{нмд}} \leq 4$ ).

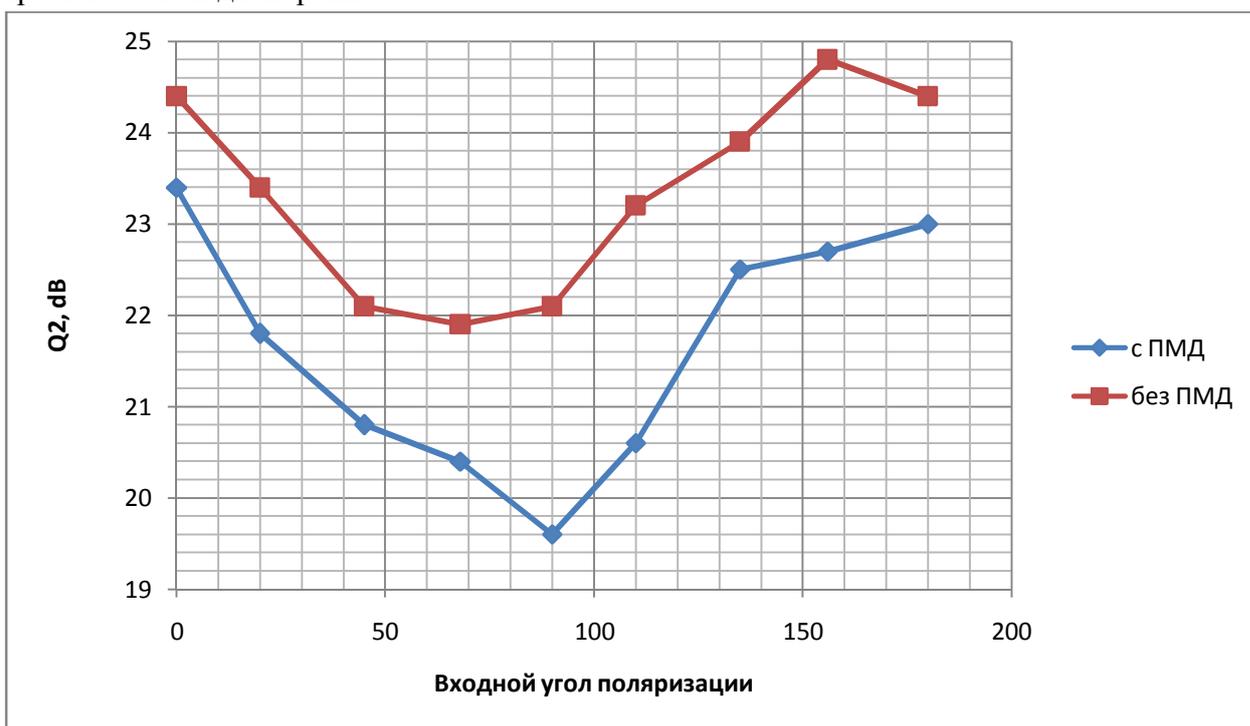
Существуют и другие решения по компенсации ПМД. Большинство компенсаторов помогают скомпенсировать только ПМД. Поэтому следует использовать оптические компенсаторы перед приемником или электрические в приемнике.

Для того, чтобы сравнить полученные решения по компенсации хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии были использованы результаты экспериментов, по полевым исследованиям линии 40 Гит/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.



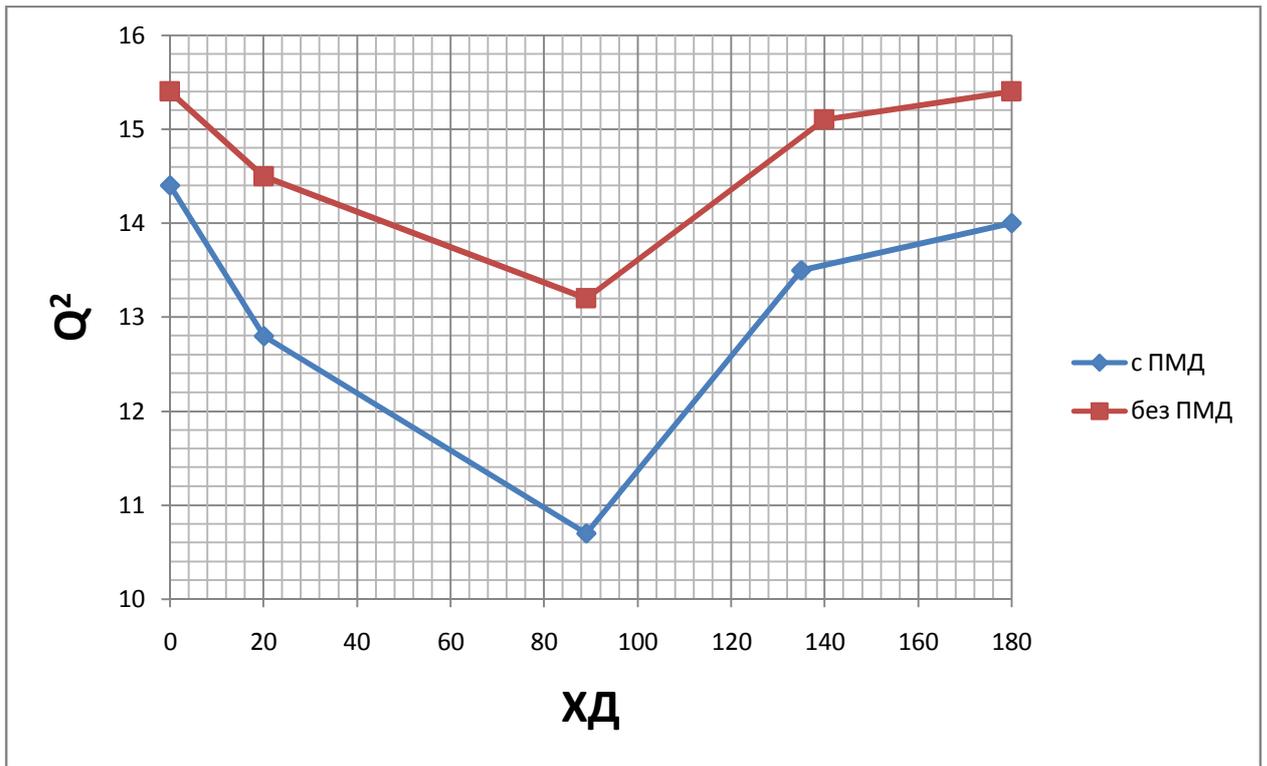


Рис. 1. Зависимость Q-фактора от ХД с ПМД и без ПМД

Опуская алгоритм решения поставленной задачи, воспользуемся последними выражениями:

$$l_{yy} = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8 \cdot |\beta_2|_{ocm}} \quad (50)$$

Определение длины усилительного участка без учета ПМД и упреждающей коррекции ошибки и с учетом ПМД:

$$l_{yy} = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8 \cdot (|\beta_2|_{ocm} + ПМД^2)} = \frac{T_0^2 \cdot d_m^2 \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{8,8 \cdot |\beta_2|_{ocm}} \quad (51)$$

Где  $|\beta_2|_{ocm}$  - остаточное значение  $|\beta_2|$  после компенсации с помощью компенсирующих оптических волокон. Учитывая  $l_{yy}=100$  км,  $V=40$  Гбит/с,  $|\beta_2|_{ocm}$  без учета ПМД будет равна  $3,125$  пс<sup>2</sup>/км, а  $|\beta_2|_{ocm}$  с учетом ПМД будет равна  $3,4375$  пс<sup>2</sup>/км, ПМД= $0,56$  пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

$$Q_{01} = \frac{T_0 \cdot d_m \cdot 3,33 \cdot \lg(M)^2}{2 \cdot \sqrt{3,125 \cdot 100}} = 1,414 \rightarrow Q_3 = 4 \cdot 20 \lg Q = 12 \text{ дБ}$$

ПМД начинает играть значительную роль при малых значениях  $\beta_2$  (остаточное затухание дисперсии групповых скоростей после компенсации с помощью компенсирующих ОВ). На рисунке 2 показана зависимость поляризационно-зависимой хроматической дисперсии как функции длины волны ОВ с величиной ДГЗ= $14,7$  пс.

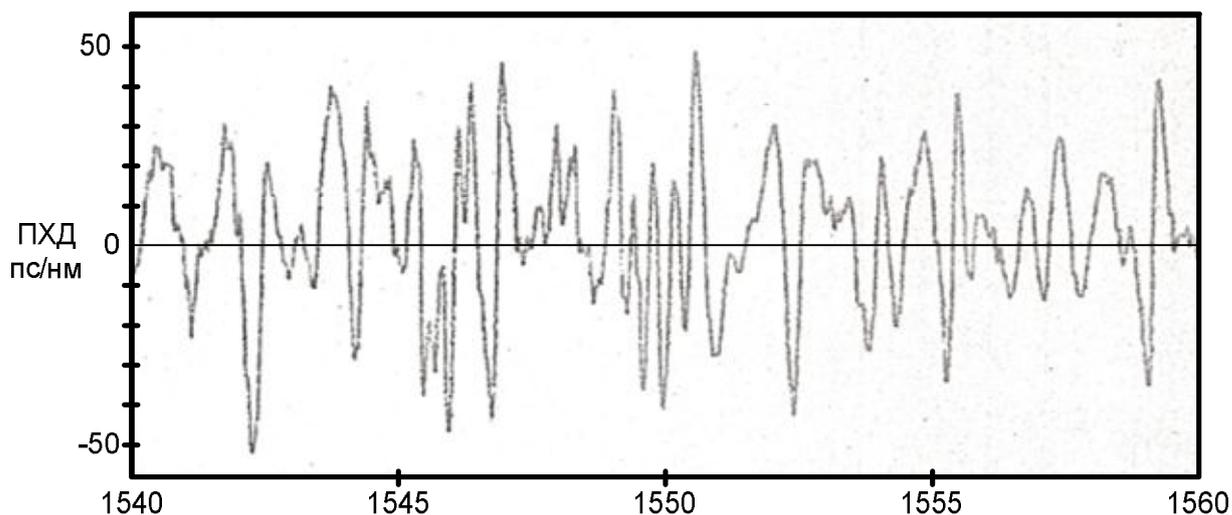


Рис. 2. Поляризационно-зависимая хроматическая дисперсия как функция  $\lambda$  для ОВ с ДГЗ=14,7 пс (при  $D \cdot l = D \cdot l \pm \frac{1}{2} \cdot \Delta ПМД_x$ ;

$$\Delta ПМД_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \Delta ПМД_{10}$$

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 3 представлена зависимость Q-фактора как средней величины ПЗП ВОЛП для нескольких значений ДГЗ.

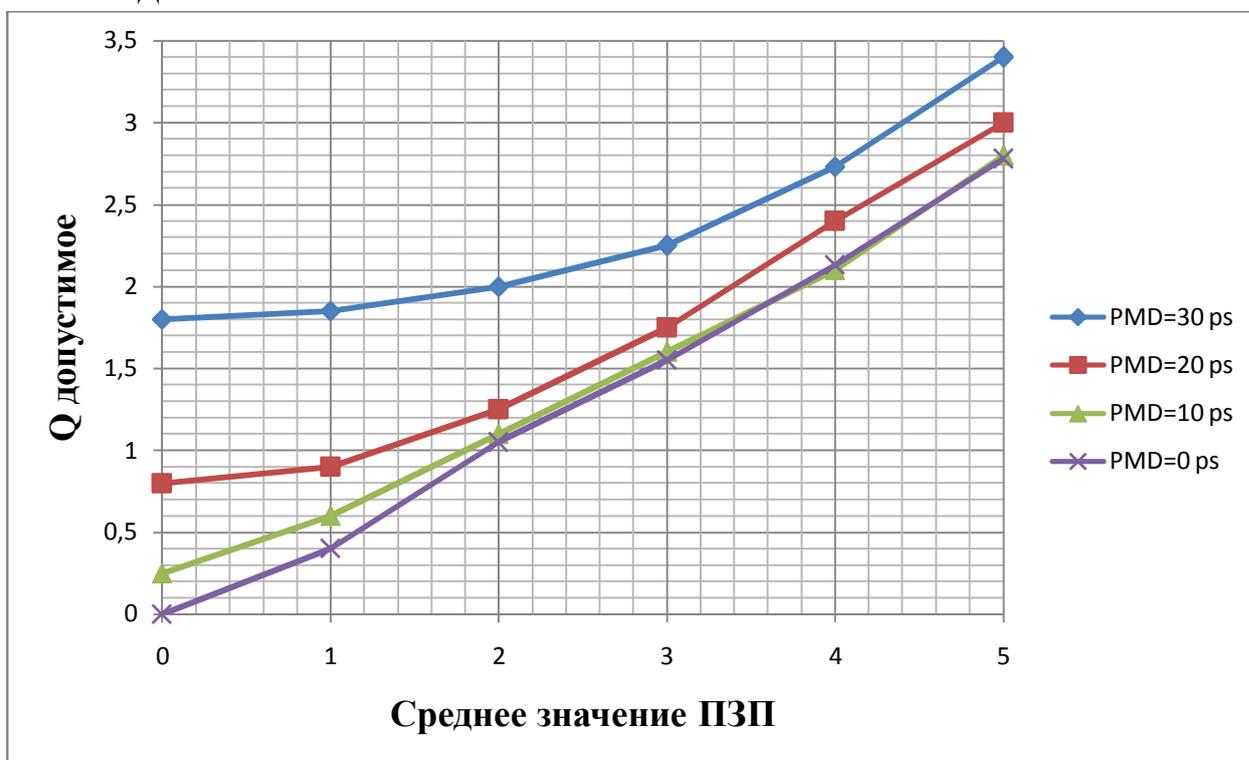


Рис. 3. Зависимость среднего значения ПЗП от Q-допустимых потерь для нескольких значений ПМД.

Решение реализуется выражением:

$$\left(10 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}\right)^2 = ПМД^2 \cdot l \cdot (1 + 0,111 \cdot ПМД^2 \cdot l) \quad (52)$$

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 упреждающей 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.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **В ведущих периодических изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. 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;
2. 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;
3. Григорьян А.К. Оценка методики расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии // Электросвязь. 2012. №12;
4. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Алгоритмическая методика определения поляризационной модовой дисперсии на волоконно-оптической линии // Т-Comm – телекоммуникации и транспорт. 2013. №8. С.99-101;
5. Григорьян А.К. Портнов Э.Л., Кочемасов Д.В. Новые технические решения по соединителям волоконной оптики // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2012. №1. С.27-32;
6. Портнов Э.Л., Григорьян А.К., Поляризационная модовая дисперсия на волоконно-оптической линии передачи // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2014. №9. С.62-65;
7. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2485559 «ТРЕХКАМЕРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ» Опубликовано 20.06.2013. Бюл. №17;
8. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2488184 «ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ С ОТКРЫТЫМ МОДУЛЕМ» Опубликовано 20.07.2013. Бюл. №20;
9. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Патент на изобретение №2485560 «ЧЕТЫРЕХКАМЕРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ СВЯЗИ» Опубликовано 20.06.2013. Бюл. №17;

##### **В других изданиях:**

10. Портнов Э.Л., Григорьян А.К. Упреждающая коррекция ошибки при скоростях передачи 10-100 Гбит/с при форматах модуляции NRZ, RZ и CRZ // Труды

- РНТОРЭС им. А.С. Попова. Научная сессия, посвященная дню радио. LXVI. Москва 2011. С. 111-113;
11. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Оценка допустимых норм по хроматической и поляризационно-модовой дисперсиям // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2011 международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2011. С. 99-103;
  12. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Ограничения по применению современных оптических волокон в будущем // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2010 Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2010. С. 152-153;
  13. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Ускоренное решение по определению вероятности ошибки в волоконно-оптической линии передачи // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2010 Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2010. С. 154-156;
  14. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. О зависимости хроматической и поляризационной модовой дисперсий от длины волны // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2013 Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2013. С. 82-86;
  15. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. О времени нарастания фронтов импульсов и накопленная дисперсия в оптическом канале системы передачи // НТК МТУСИ-2011;
  16. Григорьян А.К. Портнов Э.Л. Как определить требуемую длину оптического волокна для компенсации дисперсии // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2012», МИРЭА, М.: 2012г., часть 4;
  17. Григорьян А.К. Один из методов компенсации хроматической дисперсии с помощью устройств с расширением оптического луча // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2012» МИРЭА, М.: 2012г., часть 6 с.64-66;
  18. Григорьян А.К. Определение поляризационной модовой дисперсии на волоконно-оптической линии передачи./ Григорьян А.К. Портнов Э.Л. // Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2013», МИРЭА, М.:2013;
  19. Григорьян А.К. К методике расчета компенсации хроматической и поляризационной дисперсии. Шестая отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», М.: 2012г.С. 111;
  20. Григорьян А.К. Портнов Э.Л. Увеличение длины усилительного участка за счет предварительной коррекции ошибки при высоких скоростях передачи, НТК МТУСИ, М.: 2011 г.;
  21. Григорьян А.К., Портнов Э.Л. Компенсация хроматической дисперсии с помощью устройств с расширением оптического луча // Шестая отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества», М.: 2012г.С. 111;
  22. Григорьян А.К., Когда проявляется поляризационная модовая дисперсия // МАИ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ-2014 Международный конгресс «Коммуникационные технологии и сети». Москва 2014. С. 79-81.