

**Отзыв научного руководителя на диссертационную работу
аспиранта МТУСИ Григорьяна А.К. на тему :**

**"Исследование и разработка современной методики определения
влияния хроматической и поляризационной модовой дисперсий на
передачу сигналов и методов их компенсации при высоких скоростях
передачи"**

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).

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, М. Накасава, Х. Вебер, С. Сомеда и другие.

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. 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.

Основной целью 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.

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.

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, 40 Гбит/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.

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, ХД, ПМД и упреждающей коррекции ошибки.

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 $\sim 20\%$, 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.

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 работе приведены типовые значения параметров ПМД для оптического волокна без компенсации дисперсии при норме на ПМД $0,1T_6$. 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 применении различных форматов модуляции и упреждающей коррекции ошибки необходимо учитывать влияние ПМД на дисперсионную длину и, следовательно, на длину компенсирующих оптических волокон.

Показано, что увеличивая длину и число компенсирующих модулей на ВОЛП, мы увеличиваем ПМД. 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 LP₀₁ моды преобразуются в сигнал LP₁₁ и обратно LP₁₁ в LP₀₁. 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.

Исходным положением при разработке алгоритмической методики является, длина магистрали R2R, 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} .

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

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. 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.

При применении различных форматов модуляции и упреждающей коррекции ошибки необходимо учитывать влияние ПМД на дисперсионную длину и 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 модовой дисперсии;
- отношение сигнал/шум системы передачи.

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 $L/L_{пмд}$, где L длина ОВ, а $L_{пмд} = \frac{T_b^2}{2 \cdot D_{пмд}^2}$. Это отношение не должно быть больше 4 ($\frac{L}{L_{пмд}} \leq 4$).

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

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).

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.

В заключении изложены основные результаты работы, полученные в диссертационной работе имеющие научную новизну и практическую ценность:

- 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.

Все результаты, полученные Григорьяном А.К. являются оригинальными и достоверными. Они подтверждены сравнительным анализом с исследованиями зарубежных авторов. Результаты работы освещены в 22 научных публикациях (из них 3 патента на изобретения) и апробированы на научных конференциях и семинарах. Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым Высшим аттестационным комитетом РФ к кандидатским диссертациям, а Григорьян А.К. заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель,

д.т.н., проф.

Подпись Портнова Э.Л.

Ученый секретарь Учен.

Зотова



ФГБОУ ВПО МТУСИ
Зотова