**2.1 ОЦЕНКА ШУМОВ ВНОСИМЫХ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭФФЕКТАМИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ  
Аннотация**

Развитие телекоммуникационной сферы и инфокоммуникационных технологий, за последние два десятилетия XXI века характеризовалось бурным развитием волоконно-оптических систем и сопутствующих компонентов, а также оптической отрасли в целом. Распределение интенсивности оптического сигнала аппроксимируется гауссовой функцией и на заключительном этапе определяются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение. Описанный метод оценки влияния фазовой кросс-модуляции (ФКМ) в результате проверок показал приемлемую точность. Более точных результатов можно добиться, проведя численное моделирование зависимости влияния ФКМ на параметры передачи от параметров волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением (ВОСП-СР), конфигурации и протяженности усилительных участков, типов применяемых оптических усилителей и схем компенсации дисперсии. Следует подчеркнуть, что для точного моделирования параметры оптического волокна (ОВ) должны быть представлены с учетом частотной зависимости. В этой связи, такие параметры ОВ как коэффициент затухания, дисперсия, коэффициент нелинейности предлагается записывать в виде вектора, значения и размерность которого, определяются в зависимости от спектра занимаемого групповым сигналом и типом конкретной *xWDM*-технологии. Поскольку в сегменте транспортной сети (ТС) телекоммуникационной сети (ТКС) специального назначения (СН) наблюдается применение современных многоуровневых форматов модуляции в когерентных ВОСП-СР, то существенными становятся вопросы оценки дополнительных побочных продуктов влияния дисперсии и нелинейных эффектов, таких как ФКМ. Таким образом, существует объективная необходимость развития существующего научно-методического аппарата оценки влияния на значимые параметры ВОСП-СР. При исследовании влияния шумов четырехволонового смешения оказалось, что с увеличением расстояния (падением мощности), параметрическое четырехволновое смешение (ПЧВС) оказывает все меньшее влияние и его значением можно пренебречь. Актуальным в этой связи является нахождение той оптимальной мощности оптического сигнала в отдельных спектральных каналах и частотного разноса между ними, при которой в системе не будет наблюдаться негативное влияние ПЧВС.

Ключевые слова : волоконо-оптические системы, оптический сигнал, нелинейные эффекты, спектральный канал, сигнал, шум.

**1.Аналитическое моделирование фазовой-кросс модуляции в ВОСП-СР**

Уникальные решения в сфере инфокоммуникаций, передаче и хранении сверхбольших объемов данных, стали возможными, прежде всего благодаря развитию волоконно-оптических систем передачи и фотоники [1–3]. В России развитию и освоению фотонных и смежных с ними технологий уделяется повышенное внимание [3], благодаря чему на современном этапе наблюдается стабильный тренд в направлении улучшения инфокоммуникационного пространства страны. В транспортных сетях (ТС) связи внедрение оптических технологий передачи, с точки зрения требуемых сегодня пропускных способностей каналов, является безальтернативным.

Построение линейных трактов (ЛТ) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) на основе *DWDM*-технологии позволило повысить их пропускную способность и спектральную эффективность. В таких системах наряду с традиционными факторами, ограничивающими дальность и достоверность передачи оптических сигналов (ОС) становятся существенными вопросы оценки дополнительных составляющих, как правило, побочных продуктов влияния дисперсии и нелинейных эффектов (НЭ) [2, 3]. Транспортные сети телекоммуникационных систем (ТКС) ведомственного назначения (ВН) отличаются от ТС ТКС общего пользования (ОП) не только топологической и потоковой структурами, способами формирования (наложенные, выделенные), повышенными требованиями к *устойчивости* и *безопасности*, но и вариативностью требований к количеству и качеству организуемых сетевых трактов. Таким образом, существует объективная необходимость развития существующего научно-методического аппарата оценки влияния НЭ с учетом особенностей функционирования ВОСП на основе *DWDM*-технологии в сегменте ТС ТКС ВН [3, 4].

Одним из основных НЭ, оказывающих существенное влияние на качество передачи оптических сигналов в ВОСП-СР является *фазовая кросс-модуляция* – ФКМ (*XPM* – *Cross Phase Modulation*). Она возникает по причине наличия эффекта Керра в ОВ и заключается в том, что модуляция интенсивности несущей вызывает модуляцию фаз в остальных спектральных каналах, что можно охарактеризовать как набег фазы. Этот процесс приводит к возникновению флуктуаций интенсивности оптического сигнала [3, 4]. Наряду с этими явлениями ФКМ приводит к появлению джиттера ОС. Последнее обусловлено различием скоростей распространения оптических импульсов относящихся к разным спектральным каналам (СК) [3–6]. Из-за разности скоростей распространения оптических импульсов, возникают смещения импульсов в красную затем в синию область спектра. В ВОСП с управлением потерями и ВОУ флуктуации мощности приводят к ассиметричному взаимодействию между СК. В совокупности флуктуации амплитуды, обусловленные ФКМ и джиттер приводят к искажению формы оптических импульсов во всех СК, что выразится в ухудшении соотношения оптический сигнал/шум (ООСШ) [3–6]. Степень влияния ФКМ на характеристики ВОСП зависит главным образом от мощности ОС в каждом СК и их количества, частотного интервала между несущими СК, дисперсионных и нелинейных характеристик ОВ.

В ряде работ [3, 4] по данной проблематике предлагается для оценки влияния ФКМ использовать максимально допустимый набег фазы. Однако такой подход не обладает приемлемой точность и адекватностью применительно к ВОСП на основе *DWDM*-технологии [5, 6].

При исследовании влияния ФКМ на системные характеристики линейного тракта ВОСП на основе *DWDM*-технологии используется модель распространения ОС в оптических системах связи со спектральным разделением, представленную в работах[4–7]

Для оценки влияний, обусловленных ФКМ в работах [6, 8–10] предлагается использовать параметр – штраф по мощности, определяемый как отношение требуемой средней мощности на приеме в отсутствии и при наличии НЭ для заданного значения ООСШ.

Довольно часто при оценке степени влияний таких сложных по своей сути процессов как нелинейные эффекты в ОВ прибегают к введению определенных допущений и ограничений. Для приведенной ниже аналитической модели оценки влияния ФКМ характерны следующие допущения: шум вследствие биений сигнал-УСИ является преобладающим; рассматриваются ВОСП с модуляцией интенсивности, где ФКМ влияет только на сигнальные(«1») биты.

В этом случае штраф по мощности из-за воздействия ФКМ будет определяться на основе выражения

(1)

где – среднеквадратичное отклонение интенсивности бита «1», вызванное явлением ФКМ, нормированное относительно квадрата мощности сигнала. Для сравнения: штрафу по мощности в 1дБ соответствует при *Q*=7 (*BER*=10-12) [5, 6].

Проведение анализа на основе предложенного [6] подхода "накачка – тестовый сигнал" может быть полезным для оценки , где средняя мощность тестового спектрального канала *P*1 определяется так, что модуляция интенсивности, вызванная ФКМ, будет соответствовать нормальным условиям работы ВОСП. Отклонение находится посредством суммирования и интегрирования спектральной плотности мощности (СПМ) искажений ФКМ наведенных различными СК и нормированное относительно .

(2)

где – СПМ модуляции интенсивности *i*-го СК на входе ОВ; – количество влияющих СК; – передаточные функции эквивалентной линейной модели модуляции интенсивности, вызванной ФКМ, связанные с *i*-м влияющим СК и электрическим фильтром на приемном конце [6, 8–10].

При таком рассмотрении, для учета влияния всех сопутствующих факторов, вызванных осуществляется с предположением о том, что распределение флуктуаций интенсивности тесового сигнала, обусловленных ФКМ, соответствует нормальному закону распределения. Полученное в результате распределение интенсивности ОС аппроксимируется гауссовой функцией и на заключительном этапе определяются математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение [6, 8–10].

Процесс распространения ОС в ВОС СР с учетом дисперсии и НЭ описывается связанным нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) [4–6]. Рассмотрим оптические зондирующий сигнал и накачку и , распространяющиеся в одном ОВ:

(3)

где – коэффициент затухания ОВ, – коэффициент нелинейной связи, – нелинейный показатель преломления, и – длины волн зонда и сигнала накачки, – эффективная площадь сердцевины волокна, и , – оптические мощности зондирующего сигнала и накачки, – относительное отклонение между двумя сигналами, – длина волны волокна с нулевой дисперсией и наклон дисперсии, а – расстояние между длинами волн [5].

Выполнив преобразование выражения (3), интегрируя все вклады ФКМ вдоль ОВ, добавляя потери () и линейную фазовую задержку, можно рассчитать суммарную интенсивность шума на длине ОВ *z = L*

, (4)

где - средняя оптическая мощность зондирующего сигнала на конце волокна *z = L*. В предположении, что , а ширина полосы модуляции намного меньше разноса СК, т. е. , выражение для описания относительной флуктуации амплитуды, индуцированной ФКМ, запишем в виде , тогда

, (5)

где , – дисперсионный параметр второго и третьего порядков соответственно [3–7].

Как видно из уравнения (5), ФКМ в ВОСП СР становится доминирующим НЭ для более высоких входных мощностей передаваемых по ОВ и использовании протяженных участков линейного тракта. Можно предположить, что с увеличением расстояния (падением мощности), ФКМ оказывает все меньшее влияние и его значением можно пренебречь. Актуальным в этой связи является нахождение той оптимальной мощности оптического сигнала (использование различных форматов многоуровневой модуляции), при которой ФКМ не будет оказывать негативного воздействия на параметры ВОСП СР.

**2.Аналитическое моделирование четырехволнового смешения в линейном тракте ВОСП-СР.**

Оптическое волокно (ОВ) в этой связи выполняет функции направляющей системы, в которой разные введенные оптические сигналы взаимодействуют друг с другом через нелинейный отклик электронов внешних оболочек [4, 5], что приводит к появлению новых частотных компонент. Такие процессы называются параметрическими, поскольку генерация новых спектральных составляющих обусловлена светоиндуцированным изменением параметров передачи ОВ. Одним из таких нелинейных процессов является *параметрическое четырехволновое смешение* (ПЧВС) (*four wave mixing* – *FWM*). При определенных условиях ПЧВС может быть доминирующим воздействием, вследствие которого ухудшаются характеристики среды передачи оптических сигналов. Таким образом, становится очевидным важность оценки степени влияния ПЧВС, наводимого в линейных трактах ВОСП со спектральным разделением каналов [3–6].

Примем допущение, что в системе передачи всеми неупругими взаимодействиями, за исключением ПЧВС можно пренебречь. Тогда физический процесс ПЧВС описывается в виде системы дифференциальных уравнений вида [3, 5, 6]:

, (1)

где – коэффициент распространения для *n*-й волны (*n*=*k*, *l*, *m*); – нелинейный коэффициент ОВ; – коэффициент фазового согласования; – огибающие взаимодействующих волн; – продукт ПЧВС; – коэффициент вырождения, принимающий значение 1 или 2 для вырожденного или невырожденного ПЧВС, соответственно.

Следует отметить, что определяется разностью постоянных распространения взаимодействующих волн и оказывает значительное влияние на степень воздействия ПЧВС на параметры ОВ [3, 5, 6]. Данный параметр В работах [6–8],коэффициент фазового согласования предлагается учитывать с помощью аналитической модели вида:

, (2)

где – расстояние между соответствующими СК; – удельная хроматическая дисперсия; – наклон дисперсионной характеристики.

В этой связи излучение ПЧВС может быть определено на основании выражения

, (3)

Для пассивных участков ЛТ ВОСП СР мощность сигнала ПЧВС учитывая (3) будет определяться с помощью уравнения [6, 8]

, (4)

где – длина ОВ; – коэффициент затухания ОВ; – эффективность ПЧВС, которая определяется с помощью выражения

. (5)

Анализ (5), показывает, что эффективность ПЧВС зависит от дисперсионных характеристик ОВ, расстояния между СК и протяженности ЛТ, и мало зависит от мощности в отдельных СК и группового ОС в целом [6]. Это утверждение справедливо для малых длин элементарных кабельных участков. В тех случаях, когда ЛТ ВОСП СР состоит из протяженных усилительных участков явление ПЧВС будет оказывать значительное влияние на параметры системы передачи [4–6].

Однако для моделирования и оценивания влияния ЧВС в системах со спектральным разделением такой подход не обладает достаточной точностью. Хорошие результаты при расчете влияния ПЧВС достигаются, если учитывается частотная зависимость таких параметров ОВ как коэффициент затухания, дисперсия, коэффициент нелинейности [3–6]. В ВОСП СР с числом СК более 40 это может привести к значительным временным и вычислительным затратам. Анализ выражения (4) показывает, что с увеличением расстояния (падением мощности), ПЧВС оказывает все меньшее влияние и его значением можно пренебречь. Актуальным в этой связи является нахождение той оптимальной мощности оптического сигнала (различных форматов многоуровневой модуляции) в отдельных СК и частотного разноса между ними, при которой в системе не будет наблюдаться негативное влияние ПЧВС.

Поскольку в оборудовании линейных трактов ВОСП СР ведомственного назначения (ВН) наблюдается применение современных многоуровневых форматов модуляции, то существенными становятся вопросы оценки дополнительных побочных продуктов влияния дисперсии и нелинейных эффектов, таких как ПЧВС. Таким образом, существует объективная необходимость развития существующего научно-методического аппарата оценки влияния ПЧВС с учетом особенностей функционирования ВОСП СР ВН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 24 июля 2013 г. № 1305-р. Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)» URL:http://static.government.ru/media/files/41d47df26b496588f061.pdf (дата обращения: 23.10.2020)

2. Развитие фотоники в России и мире: публичный аналитический доклад – Skoltech. URL:https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/fotonika.indd\_.pdf (дата обращения: 12.10.2020)

3. Цуканов, В. Н. Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство / В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.

4. Саитов И. А. Волоконно-оптические системы передачи: основы построения, характеристики оптических компонентов: учебное пособие/ И.А. Саитов, К.И. Мясин, Н.И. Мясин, В.Ю. Головачёв, А.В. Яковлев – Орёл: Академия ФСО России, 2015. – 352 с.

5. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. – Jon Wiley&Sons. –2002. – 562 p.

6. Андреев В.А. Рамановские усилители на волоконно-оптических линиях передачи: Монография / В. А. Андреев, М. В. Дашков. – М.: Ириас, 2008. –219 с.