



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

инж. Емануил Темистоклис Кипреос

**МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИПЛЕКСИРАНИ
СИГНАЛИ В ПАСИВНИ ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма: „Комуникационни мрежи и системи“

Габрово, 2025 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

инж. Емануил Темистоклис Кипреос

**МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИПЛЕКСИРАНИ
СИГНАЛИ В ПАСИВНИ ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма: „Комуникационни мрежи и системи“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти: проф. д-р инж. Теодор Божидаров Илиев

доц. д-р инж. Красен Киров Ангелов

Габрово, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, проведен на 17.12.2025 г.

Дисертационният труд съдържа 126 страници. Научното съдържание е представено в увод, четири глави и заключение, и включва 128 фигури и 12 таблици. Цитирани са 79 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката на дисертационния труд е извършена в катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.03.2026 г. от 13:00 ч. в зала 2215, сграда Учебен корпус №2 „Баждар“ на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение за интересуващите се в кабинет 3209, Учебен корпус №3 Ректорат на Технически университет – Габрово.

Рецензиите и становищата на членовете на научното жури и авторефератът са публикувани на сайта на университета: www.tugab.bg.

Автор: © Емануил Темистоклис Кипреос

Заглавие Методи и алгоритми за изследване на мултиплексирани сигнали в пасивни оптични комуникационни мрежи

Тираж: 5 бр. (Бълг. език)

Място на отпечатване: Университетско издателство „Васил Априлов” при ТУ - Габрово

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Методите и алгоритмите за изследване на мултиплексирани сигнали в пасивни оптични комуникационни мрежи (PON) са важни по няколко ключови причини, които обхващат както физичното ниво, така и мрежовата ефективност и надеждност. Алгоритмите за анализ на мултиплексирани сигнали позволяват решаване на редица оптимизационни задачи като оптимално разпределение на наличния ресурс, минимизиране на спектралното припокриване и загубите и увеличаване на общия капацитет без физическо разширяване на мрежата.

Тъй като в пасивните оптични мрежи сигналите се комбинират и разделят пасивно, това води до междуканална интерференция, хроматична и поляризационна дисперсия и нелинейни ефекти при високи скорости. Методите за анализ и обработка на сигналите биха спомогнали за точно разделяне на сигналите, намаляване на битовата грешка (BER) и повишаване на качеството на обслужване (QoS).

Всички горепосочени показатели са критични за мащабируемостта на PON мрежите. Методите и алгоритмите за изследване на мултиплексирани сигнали са основата за надеждни, високоскоростни и мащабируеми пасивни оптични мрежи. Те позволяват да се увеличи капацитетът, да се намалят грешките, да се поддържат нови услуги и да се оптимизират разходите — без промяна на пасивната оптична инфраструктура.

Настоящият дисертационен труд анализира основните методи и предлага синтез на алгоритми и практически ориентирани модели за изследване и решаване на оптимизационни задачи в оптични комуникационни системи, използващи мултиплексиране с разделяне по дължина на вълната.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да разработят коректни модели и постановки за изследване на процесите на мултиплексиране на сигналите по дължина на вълната и да се представят методи и алгоритми подобряване на надеждността и ефективността на комуникацията и качеството на услугите в многоканалните пасивни оптични мрежи.

За реализирането на формулираната цел е необходимо решаването на следните *обобщени задачи*:

1. Създаване и описание на методология за комплексно изследване на процесите на мултиплексиране и предаване на сигнали в многоканални пасивни оптични мрежи.
2. Синтезиране и разработка на симулационни модели в средите на OptiSystem и Matlab/Simulink за изследване на процесите на кодиране и оптична модулация и за изследване на влиянието им върху ефективността на модела на многоканална пасивна оптична мрежа.

3. Извършване на изследване на параметрите на многоканална пасивна оптична мрежа и на възможностите за подобряване на качеството на предаваната информация, ефективността и обхвата на мрежата при различни конфигурационни параметри и статистическа обработка на резултатите.
4. Разработка на практически лабораторен модел за изследване на влиянието на параметрите на настройка и конфигурационните параметри върху качеството на услугите и ефективността на многоканалната оптична мрежа и да се предложат методи и мерки за нейното подобряване.

Методите за изследване са обособени основно в отделните глави, като аналитични, симулационни и практически, и обхващат зависимостите на параметрите, характеризиращи реализацията на отделните модели.

Научна новост

Научната новост в дисертационния труд може да бъде сведена до следните по-съществени приноси:

1. Синтез на методология и алгоритъм за оптимално планиране, оразмеряване, моделиране и изследване на пасивни оптични мрежи със спектрално мултиплексиране на сигналите.
2. Разработка и изследване на компленсни имитационни модели на многоканални високоскоростни оптични комуникационни мрежи за решаване на оптимизационни задачи по критерии постигане на минимална стойност на BER или максимален Q фактор и осигуряване на максимална производителност и ефективност на мрежата при различни входни параметри на сигналите.
3. Разработка и изследване на специализирана опитна постановка на пасивна оптична мрежа (PON) със спектрално мултиплексиране на сигналите за доставка на интерактивни услуги, предназначена за изпълнение на три основни задачи: да позволи голямо разнообразие от практически изследвания (обработка на трафика, въвеждане на нови услуги и модули за управление и комуникация, и др.); да бъде платформа за провеждане на общи изследвания в областта на пасивните оптични мрежи; да осигури удобно и лесно обучение на персонал.

Приложимост

Приложимостта на дисертационния труд е свързана със създаване на методологии от процедури, свързани с коректни подходи при моделиране, избор и реализация на архитектура, необходимото оборудване и правилното конфигуриране, чрез мониторинг и оценка на параметрите на сигналите в пасивни оптични мрежи със спектрално мултиплексиране на

сигналите, свързани с подобряване на надеждността и ефективността на комуникацията и качеството на услугите в тях.

Апробация на дисертационния труд

Основните етапи от разработване на дисертационния труд са представени в шест публикации на международни конференции и научни издания, напълно покриващи минималните изисквания относно разглеждания критерий. Един от трудовете е изнесен на международна научна конференция UNITECH 2025, три от трудовете са изнесени на национална конференция „TechCo 23-24“ и два от трудовете – на „Студентка научна сесия 2024“ на ТУ - Габрово. Две от публикациите са самостоятелни. Публикациите са издадени в сборници с научно рецензиране в периода на обучение 2023-2025 г., като реално представят близо 2/3 от съдържанието на дисертационния труд. В публикациите са представени голяма част от извършените изследвания и са изложени основните изводи от дисертационния труд.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд включва увод, четори глави, заключение, списък на използваните съкращения, списък на публикациите по дисертационния труд и списък на използваната литература. Общият обем е изготвен в общ обем от 126 страници и включва 128 фигури и 12 таблици. Цитирани са 79 литературни източника.

II. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМИ В ПАСИВНИТЕ ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ СЪС СПЕКТРАЛНО МУЛТИПЛЕКСИРАНЕ

1.1. Многоканални оптични комуникационни линии и тяхното значение

Нарастването на информационните потоци през последните години, както и тяхното глобализиране, поставят извънредно сериозни изисквания към комуникационните аспекти на материалната ни култура и в особено висока степен – към световодните комуникационни системи (СКС).

1.1.1. Уплътняване на световодната линия във времевата област

Като първи етап от създаването на многоканални СКС се използва уплътняването на СЛ във времето.

Технологията TDM се реализира в тази част от предавателната субсистема на СКС, която е преди модулатора (и преди оптичния източник), т. е. на електронно равнище. Комплектният ИКС е първоначално електронен, а след като модулира източника на оптично лъчение се превръща в оптичен.

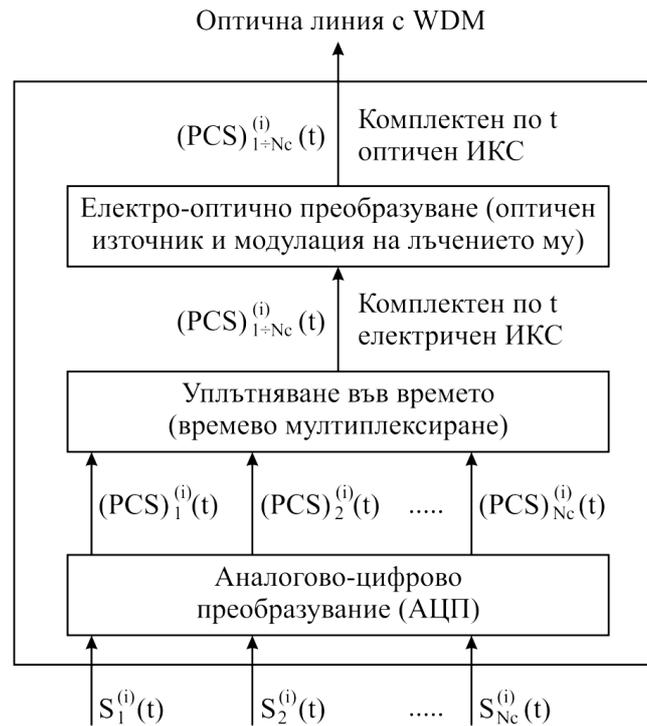
1.1.2. Уплътняване на световодната линия във вълновата област

В случаите, в които е необходимо предаване на извънредно големи количества информация на големи разстояния, може да се окаже, че дадено конкретно уплътняване на СЛ във времевата област, т.е. осъществено с технологията TDM, не е достатъчно. Тогава се преминава към втория етап на изграждането (по-точно на доизграждането) на многоканалната СКС, а именно - към допълнително уплътняване на СЛ, но вече във вълновата (в хроматичната) област. Това уплътняване се извършва чрез съвместно използване на K субСКС от типа TDM (с N_c канала във всяка една от тях), разделени по дължина на вълната, т.е. с разнесени по оста λ вълнови обхвати.

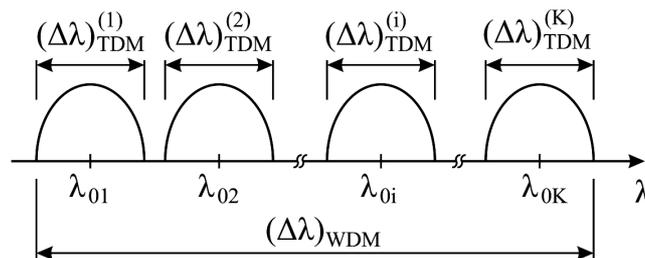
1.2. Архитектура на съвременните многоканални оптични комуникационни системи

1.2.1. Структурна схема на оптична система с TDM технология

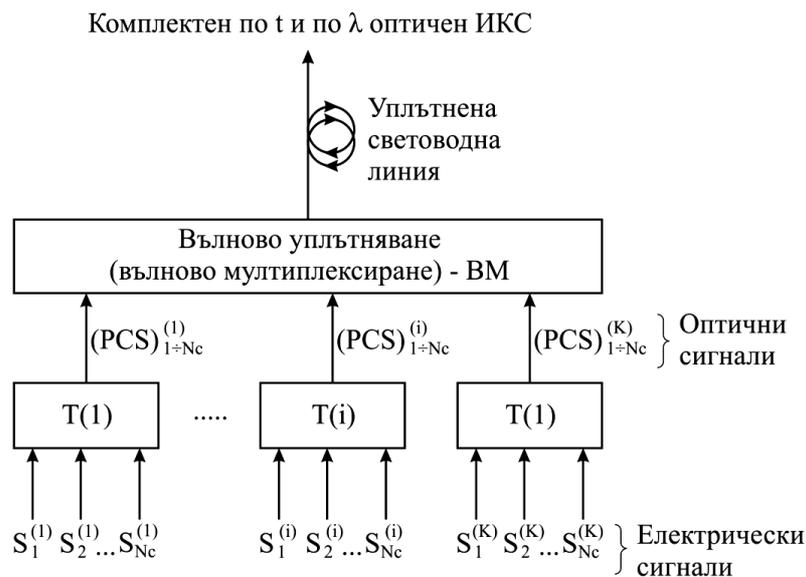
На (фиг. 1.1) е представена примерна структурна схема (в значително опростен вид) на предавателната част на една СКС с TDM. Тя е означена с T(i), защото тази СКС може да се разглежда като (i)-та субСКС с TDM в състава на инфраСКС с WDM (както е направено по-долу).



Фиг. 1.1. Предавателна част на i -тата СКС с TDM (означена с $T(i)$)



Фиг. 1.2. Диаграма по оста λ на СКС с WDM технология



Фиг. 1.3. Предавателна част на СКС с WDM

1.2.2. Структурна схема на оптична система с WDM технология

На фиг. 1.2 е показано в опростен вид съподреждането по вълновата ос λ на вълновите интервали, ангажирани от отделните (на брой K) субСКС с TDM в състава на една инфраСКС с WDM.

На фиг. 1.3 е представена (също в опростен вид) структурната схема на предавателната част на инфраСКС с WDM.

1.3. Основни параметри на оптичните линии със спектрално мултиплексиране

Техническите характеристики на WDM системите се определят основно от следните характеристики на отделните компоненти:

- Мощност и стабилност на лазерния предавател.
- Брой на каналите.
- Честотно отстояние между каналите.
- Скоростта на модулация на лазерния предавател.
- Коефициент на усилване EDFA усилвателите.
- Коефициент на усилване на приемника.
- Характеристики на оптичните влакна.

Тези параметри описват основните характеристики на WDM системата.

1.4. Основни проблеми в оптичните линии със спектрално мултиплексиране

1.4.1. Дрейф на дължината на вълната и мощност на сигнала

Абсолютно стабилни източници на излъчване не съществуват. Мощността на сигнала и централната дължина на вълната винаги се изменят с течение на времето.

Причината за постоянното изменение на честотата и мощността са промени в температурата, обратно отражение и „жуженето“ на честотата на излъчването на лазера.

1.4.2. Кръстосани шумове

Кръстосани шумове – това е нежелано попадане на сигнал от един канал в сигнали от други канали. Нивото на кръстосани шумове е трудно да се определи точно преди да е напълно инсталирана и стартирана системата. Кръстосаните шумове трябва да се измерват в реална ситуация при наличие (или в краен случай симулация) на действителни сигнали.

1.4.3. Нелинейни ефекти

Нелинейните ефекти, които обикновено не се появяват при тестване на влакното, може да станат значителни само след въвеждане на мрежата в

експлоатация. Включването и стартирането на оборудването може да доведе до нелинейни ефекти. Всички нелинейни смущения трябва да се контролират в процеса на стартиране на оборудването и периодично по време на експлоатация на цялата мрежа.

1.4.4. Четири-вълново смесване

От множеството нелинейни ефекти, особеност представлява четири-вълновото смесване (FWM), което изисква специално внимание поради сериозността на последиците от неговото въздействие върху производителността на мрежата. Нелинейното взаимодействие на оптичните сигнали може да доведе до появата на паразитни сигнали, чиито дължини на вълните може да съвпада с дължините на вълните на съседни канали и да наруши функционирането на мрежата.

1.4.5. Поляризационно-модова дисперсия

В участъци с влакна с голяма дължина, които са характерни за реалните мрежи, поляризационно-модовата дисперсия (PMD) възниква по редица причини: поради вътрешните нехомогенности във влакната, механични смущения в местата на огъване и напрежения във влакното, различни температурните ефекти и др

1.4.12. Хроматичната дисперсия

Внимателно подбирайки и по този начин контролирайки стойността на хроматичната дисперсия може да се намалят неколккратно нелинейните ефекти. В някои случаи при приемливо ниво на пълната дисперсия е възможно да се минимизират различните нелинейни ефекти във влакното.

1.4.13. Други параметри на WDM системи

Върху техническите характеристики на компонентите в оптичните комуникационни линии влияние указват и редица други параметри и фактори, към които се отнасят:

- Параметри, свързани с кръстосания шум (прослушване):
 - нивото на прослушване в честотната лента (dB);
 - нивото на прослушване извън честотната лента (dB);
- Параметри, свързани с честотата на сигнала:
 - пулсации (dB);
 - внесени загуби (dB);
 - ширината на канала (GHz);
- Параметри, свързани с поляризацията:
 - диференциално групово време на закъснение DGD (ps);
 - пълни загуби, зависещи от поляризацията PDL (dB);

- Намаляване на съотношението сигнал/шум (dB), свързано с деградацията на лазера, оптичните усилватели и други компоненти на WDM система.

1.5. Анализ и изводи към Глава 1

Тъй като пасивните оптичните комуникационни мрежи със спектрално мултиплексиране се използват основно в градска среда и са с голям обхват, се налага да се търсят ефективни модели за тяхното планиране и оптимизиране, което е свързано с по-добра ефективност на управление и непрекъснато следене и подобряване на качеството на предлаганите услуги

Създаването на практически ориентирани и удобни за използване модели на обработката на сигналите в мрежата и на самата мрежа е от много голяма важност за осигуряване на надеждността, ефективността и качеството на обслужване в мрежата. При моделирането на оптичния канал за връзка основната задача е да се намери компромис между обхвата и капацитета на мрежата, ефективността на използваното оборудване параметрите и конфигурационните параметри на мрежата. Пропускателната способност, качественият фактор и енергийният бюджет на каналът за връзка се разглеждат като глобални параметри, защото оказват влияние едновременно върху ефективността и надеждността на оптичната комуникационна мрежа.

Енергийните параметри на предавателното оборудване, чувствителността на приемното оборудване и оптичните параметри и канална конфигурация на оптичните линии за връзка в многоканалните пасивни оптични комуникационни мрежи влияе върху техния обхват и капацитет, както и на параметрите свързани с качеството на обслужване на крайните потребители.

1.6. Цел и задачи на дисертационния труд

Същността на една многоканална пасивна оптична комуникационна мрежа се състои в това да осигурява необходимия широк набор от ширококоловни услуги на абонатите си чрез надеждно предаване на оптичните сигнали в голям обхват, като това може да се постигне чрез ефективна обработка на сигналите (кодиране и оптична модулация на сигналите), оптимално балансиране на енергийния бюджет и ефективна оценка на канала за връзка. За това с настоящия дисертационен труд се поставя за цел да се покаже до каква степен това е възможно чрез разработката на подходящи методи и алгоритми за изследване на процесите на обработка и надеждно и ефективно предаване и приемане на мултиплексирани сигнали в пасивни оптични комуникационни мрежи.

Предвид анализираниите в Глава 1 състояниие проблеми в ширококоловните пасивни оптични мрежи със спектрално

мултиплексиране, целта на дисертационния труд е да разработят коректни модели за изследване на процесите на мултиплексиране на сигналите по дължина на вълната и да се представят методи и алгоритми подобряване на надеждността и ефективността на комуникацията и качеството на услугите в многоканалните пасивни оптични мрежи.

За реализирането на формулираната цел е необходимо решаването на следните обобщени задачи:

1. Създаване и описание на методология за комплексно изследване на процесите на мултиплексиране и предаване на сигнали в многоканални пасивни оптични мрежи.

2. Синтезиране и разработка на симулационни модели в средите на OptiSystem и Matlab/Simulink за изследване на процесите на кодиране и оптична модулация и за изследване на влиянието им върху ефективността на модела на многоканална пасивна оптична мрежа.

3. Извършване на изследване на параметрите на многоканална пасивна оптична мрежа и на възможностите за подобряване на качеството на предаваната информация, ефективността и обхвата на мрежата при различни конфигурационни параметри и статистическа обработка на резултатите.

4. Разработка на практически лабораторен модел за изследване на влиянието на параметрите на настройка и конфигурационните параметри върху качеството на услугите и ефективността на многоканалната оптична мрежа и да се предложат методи и мерки за нейното подобряване.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРАНЕ НА МНОГОКАНАЛНА ОПТИЧНА КОМУНИКАЦИОННА МРЕЖА

2.1. Синтез на симулационен модел на 4-канална WDM система

Тук ще бъде представена реализацията на симулационен модел на многоканална WDM система за изследване на параметрите и характеристиките на предаваните оптични сигнали. Изборът и настройката на отделните блокове в модела е съобразена със следните примерни начални условия:

- Брой на работните канали: 4;
- Работен диапазон на дължината на вълната: $\lambda = 1550 \text{ nm}$;
- Брой участъци: до 6; Дължина на комуникационната линия: до 600 km
- Вид на оптичното влакно: SMF;
- Формати на модулация на оптичния сигнал: NRZ, RZ;
- Пропускателна способност на канала: 2,5 Gbps.

Използваният софтуер за моделиране е Optiwave OptiSystem, който е цялостен софтуерен пакет за планиране, проектиране, тестване и симулация на оптични линии за връзки на физическия слой на съвременните оптични мрежи.

2.1.1. Глобални параметри на симулационния модел

За този симулационен модел се задават следните глобални параметри (фиг. 2.1):

- Скорост на предаване (bit rate): 2500000000 Bits/s (2,5 Gbps)
- Продължителност на симулацията (Time window): $5,12 \cdot 10^{-8}$ s;
- Честота на дискретизация (Sample rate): 160 GHz;
- Дължина на последователността (Sequence length): 128 бита;
- Брой дискрети за бит (Samples per bit): 64;
- Брой дискрети (Number of samples): 8192.

2.1.2. Създаване на предаватели за 4-каналната WDM система

За реализация на 4-канална WDM система е необходимо да се мултиплексират/демултиплексират оптичните сигнали от 4 отделни източника на оптичен сигнал. За целта се създадени 4 външно модулирани оптични предаватели, всеки от тях съдържащ лазерен източник на оптичен сигнал, източник на цифров електрически сигнал, кодер на електрическия сигнал в NRZ или RZ код и Мах-Зендер модулатор на оптичния сигнал.

2.1.3. Мултиплексиране на сигналите

Получените 4 модулирани оптични сигнали на различна дължина на вълната в диапазона на 1550 nm трябва да се мултиплексират спектрално, което се извършва чрез използване на WDM мултиплексор.

2.1.4. Създаване на оптичните участъци

Дължината на всеки оптичен участък се задава чрез дължината на оптичното влакно в блок **Optical Fiber** (наличен в *Component Library/Default/ Optical Fibers Library*). Дължината на оптичното влакно за целите на симулационния модел е 100 km. Настройките на блок оптично влакно са следните (фиг. 2.9):

- затихване: 0,2 dB/km;
- дисперсия: 17 ps/nm/km;
- ефективна площ на влакното: $80 \mu\text{m}^2$;
- коефициент на пречупване на влакното: $n_2 = 2,6 \cdot 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$;
- дължина на влакното 100 km.

2.1.6. Създаване на оптични приемници

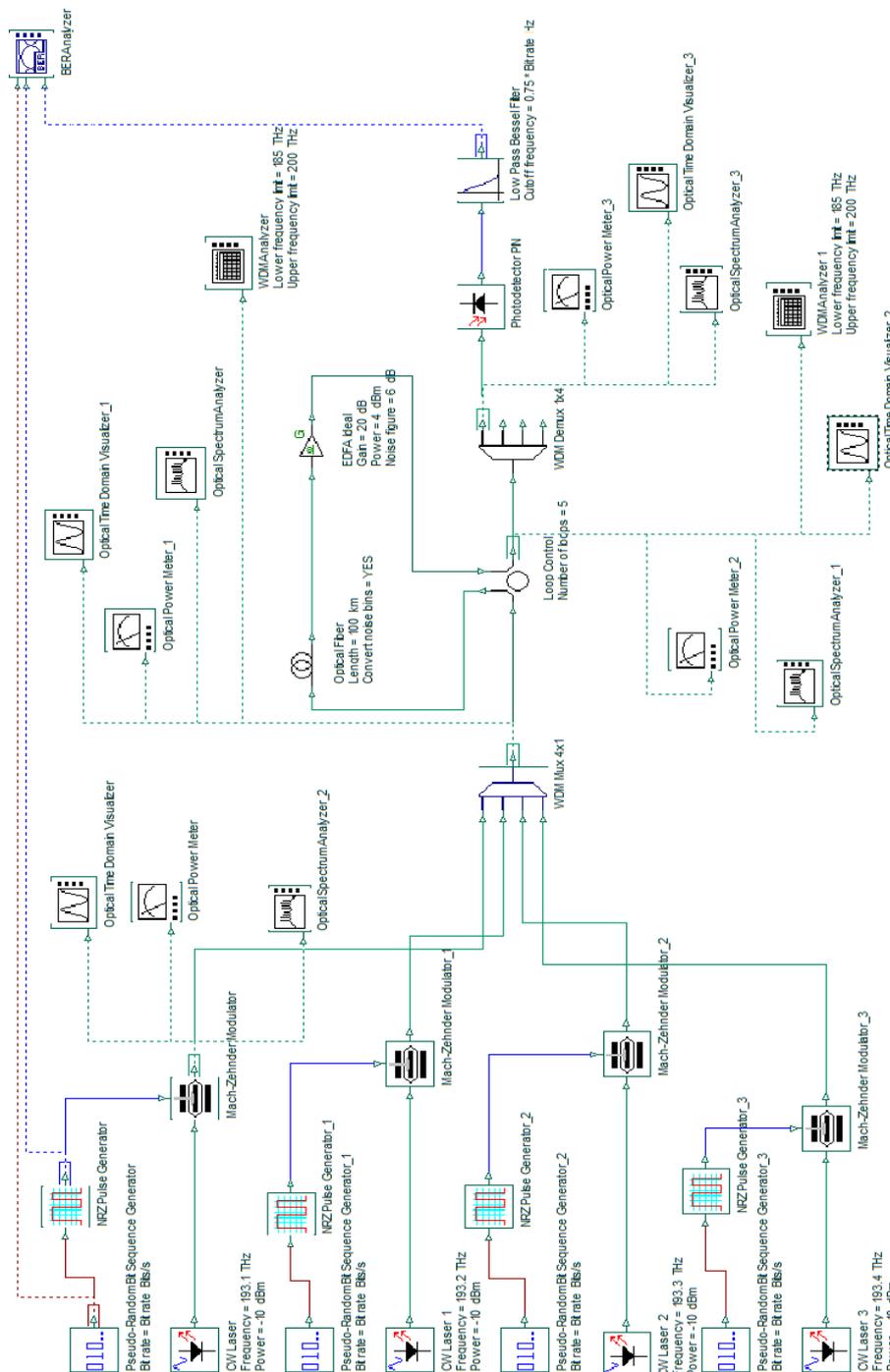
Настройките на PIN фотодетектора са следните:

- чувствителност на приемника: -25 dBm;
- стръмност на характеристиката: 1 A/W;
- ток на тъмно: 10 nA.

2.1.7. Свързване на измервателните уреди

Разположението на измервателните уреди в модела може да се види в

пълната схема, представена на фиг. 2.16.



Фиг. 2.16. Пълен вид на симулационния модел на 4-канална оптична комуникационна линия със спектрално мултиплексиране

За изследването ще използваме следните уреди:

- Визуализатор на оптичния сигнал във времевата област (Optical Time Domain Visualizer);
- Оптичен спектрален анализатор (Optical Spectrum Analyzer);
- Анализатор на BER (BER Analyzer)

- WDM Анализатор (WDM Analyzer);
- Измервател на оптична мощност (Optical Power Meter).

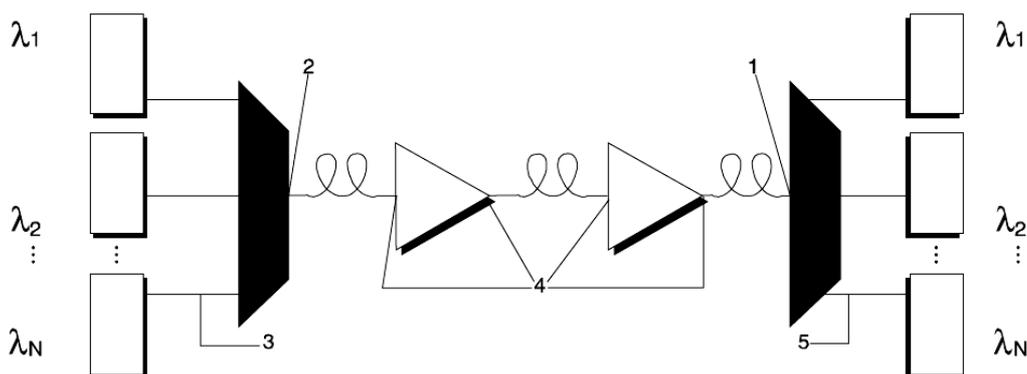
2.1.8. Симуляционен модел на 4-канална WDM система – пълен вид

На фиг. 2.16. е показана вече реализираната пълна схема, с помощта на която ще бъдат реализирани симуляционните изследвания на изследването на 4-канална WDM система в случай на NRZ кодиране на оптичния сигнал.

При RZ кодиране се използва както вече бе споменато блок **RZ** генератор на импулси (RZ pulse generator вместо NRZ pulse generator).

2.2. Методически указания за провеждане на измервания и тестване на WDM система

Мрежовите оператори са длъжни постоянно да следят за качеството на предаване по влакното. Целта на тестването на системата е да се демонстрира работоспособността на системата и целостта на предаване на данните. На фиг. 2.17 е показан пример за оптимална последователност от тестове в WDM система.



Фиг. 2.17. Последователност на тестване на WDM система за отстраняване на неизправности

1. Първата стъпка е да се тества демултиплексора в края на линия за връзка. Това позволява да се определи необходими ли са по-нататъшни допълнителни тестове. С помощта на многовълнов измервател (MWM) се измерва стойността на OSNR точността на дължината на вълната на всеки канал. За приемливи стойности на BER (напр. 10^{-12}), стойността на съотношението сигнал/шум OSNR в края на комуникационна линия трябва да бъде не по-малко от 18 dB (типични стойности на OSNR са 22 dB). В зависимост от системата и вида на фотодетектора, мощността на сигнала в канала трябва да бъде около -8 dBm. Дължината на вълната на канала трябва да съответства на номиналната стойност в рамките на няколко десетки pm (за провеждане на измерване с такава точност е необходим многовълнов измервател MWM).

2. Ако на първия етап на измерванията са открити проблеми в линията за връзка, следва да бъде измерено нивото на мощността на сигнала на изхода на изхода на мултиплексора. Неговата номиналната стойност може да варира от -5 до 2 dBm в зависимост от изискванията на доставчика на услуги. Ако измерената стойност се различава от номиналната е необходимо измерване на загубите в мултиплексора.
3. След като на базата на резултатите от предходните измервания е определен неизправната канал (каналии), следва да се провери мощността на сигнала и централната дължина на вълната за съответния лазерен предавател.
4. В следващата стъпка се проверяват EDFA усилвателите. Техният коефициент на усиление трябва да бъде линеен и еднакъв за всички канали. Разлика в коефициента на усиление с повече от 3 dB е недопустима.
5. При тестването на цифрови системи (SDH, SONET, IP и др.) трябва да бъде проверено качеството на предаването. За приемливо ниво на BER мощността на приемания сигнал трябва да бъде най-малко -20 dBm. Това измерване не е се отнася към оптичните измервания: за него е необходимо електронно оборудване.

2.3. Изводи към Глава 2

1. При проектирането на многоканалната оптична комуникационна мрежа е необходимо да се поставят изисквания, които да бъдат следвани с цел осигуряване качествена комуникация в оптичния канал за връзка, независимо от ограничения брой на каналите, излъчена оптична мощност във всеки канал, влияние на оптичната среда за пренос при разпространението на мултиплексирания оптичен сигнал в канала за връзка. Имайки предвид разнообразието от скорости, кодиране и обработка на сигналите, брой на каналите и обхват на системата, е необходимо внимателно планиране на изходните конфигурационни параметри на мрежата.
2. От съществено значение при определяне на ефективността на мрежата е изчисляването на теоретичния обхват на мрежата. За целта трябва да се имат предвид ефективността на различните методи за модулиране на оптичните сигнали, загубите от средата на разпространение, взаимното влияние на мултиплексиранияте сигнали при тяхното разпространение в оптичното влакно, както и енергийния бюджет на мрежата.
3. Нарастването на броя канали и широчината на използваната честотна лента води до увеличаване на различните нелинейни ефекти в канала за връзка, съответно до проблеми с качеството на услугите. Вижда се че предаването на информация с голяма скорост, е ограничено от броя вълнови канали, едновременно предаващи информация, а също така и от скоростта на предаване и параметрите на оптичната среда.

4. Различните формати на модулация на оптичните сигнали пряко влияят върху обхвата на мрежата и устойчивостта на мултиплексирания оптични сигнали на влиянието на нелинейни ефекти и смущения в канала за пренос. Излъчваната оптична мощност има максимално допустими стойности, надвишаването на които влошава показателите за ефективност на мрежата.
5. При планиране на многоканалната мрежата, балансът на мощностите се прави от край до край за всеки от отделните канали. В него се отразяват загубите при разпространение на сигнала и съответно запасите за тяхното компенсиране. При аналитично планиране се използват някои параметри, които са свързани със специфичния стандарт на използваното оптично влакно. Балансът на мощностите до голяма степен зависи комплексно от избраният формат на модулация, излъчената оптична мощност и чувствителността на приемника, параметрите на мултиплексиране/демултиплексиране и на оптичната среда за пренос.
6. Основните етапи от планирането и моделирането на една многоканална оптична мрежа, започват с оразмеряване, в което се отчита количеството канали, скоростта на връзката и обхвата на мрежата, както и праговите стойности за осигуряване на качеството на услугата. Вторият етап включва балансирано определяне на комплексно свързаните конфигурационни параметри при дефинирани показатели за оценка на ефективността на модела на мрежата. Последната част е оценка и оптимизация на аналитично определен енергиен бюджет на мрежата и коригиране на конфигурационните параметри на модела на мрежата.

ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНЕ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА МНОГОКАНАЛНИ ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ

3.1. Параметри на изследване на симулационния модел на 4-канална WDM система

Чрез разработеният симулационен модел на 4-канална оптична комуникационна линия със спектрално мултиплексиране (фиг. 2.16) са реализирани 2 различни случая на изследване, чиято цел е да се решат различни оптимизационни задачи в търсене на най-добри параметри при определена конфигурация на канала в комуникационната линия:

- Изследване и анализ на симулационния модел на 4-канална WDM система при NRZ модулация;
- Изследване и анализ на симулационния модел на 4-канална WDM система при RZ модулация.

За всяко от тези 2 основни изследвания се търси оптимална стойност на един определен параметър при фиксирани стойности на дадени параметри и изменение на точно определени параметри. Оптималната стойност на

параметъра се определя на базата на зададен за всяко изследване критерий.

Основните критерии по отношение на оптичните комуникационни линии със спектрално мултиплексиране са:

- зададена допустима стойност на BER: приема се $BER = 1.10^{-12}$;
- стойност на Q-фактора при допустима стойност на BER: $Q > 6$;
- оптичното отношение сигнал/шум OSNR: $OSNR > 12$;
- оптично ниво по мощност.

Като **допълнителни критерии** при оценката на параметрите на системата се използват основните характеристики на оптичния сигнал:

- разтвор на око-диаграмата – пряко свързан с BER и Q-фактора на системата);
- спектрална диаграма на оптичния сигнал – за оценка на влиянието на различни ефекти като дисперсията на сигнала, четиривълновото смесване при многоканален режим и нивото на шумовете в канала);
- диаграма във времевата област на оптичния сигнал – за оценка на междусимволната интерференция, груповото време на закъснение и др.

Изследванията за 2 основни случая (при NRZ и при RZ модулация на оптичните сигнали) се извършват в следната последователност:

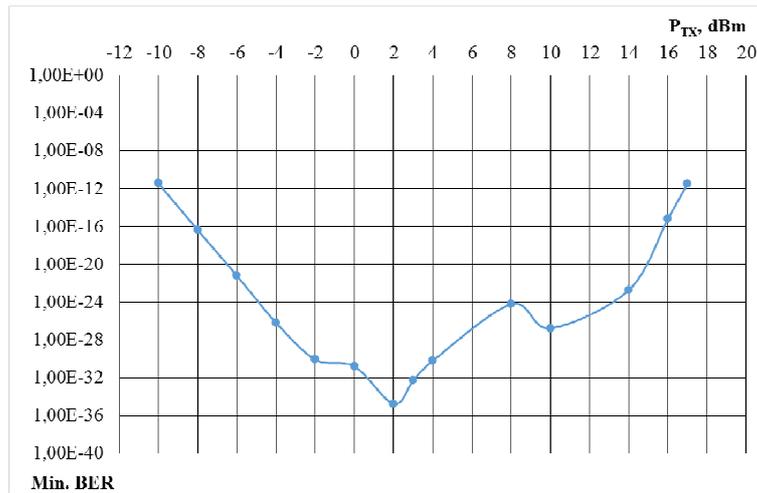
- 1) *Изследване за определяне на оптималната излъчвана мощност на каналните оптични предаватели P_{TX} :*
- 2) *Сравнителен анализ за определяне на границите на работните параметри на 4-каналната WDM система при двата различни варианта на модулация на оптичните сигнали: NRZ и RZ.*
- 3) *Сравнителен анализ за определяне на ефективността и оптималните условия на работа на 4-каналната WDM система при различен брой оптични участъци N_{AS} (т.е. различна дължина на оптичната линия) и различни нива на излъчвана мощност на каналните оптични предаватели P_{TX} .*

3.2. Изследване и анализ на симулационния модел на 4-канална WDM система при NRZ модулация.

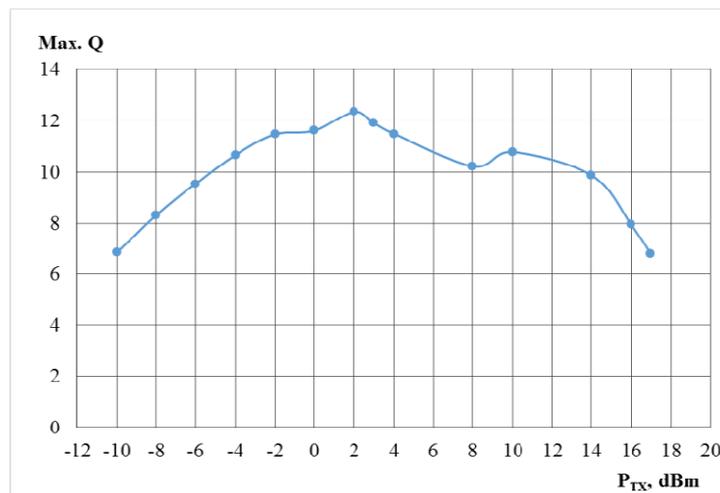
3.2.1 Параметричен анализ при промяна на P_{TX} и използване на NRZ модулация

Резултатите от изследването са представени графично на фиг. 3.1, 3.2 и 3.3.

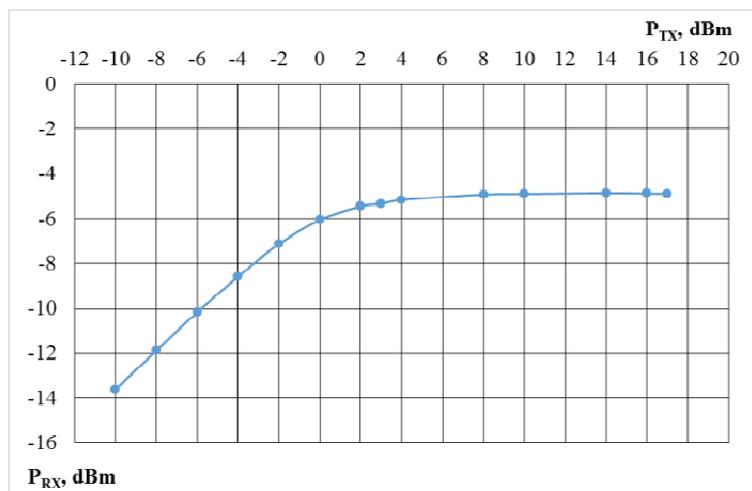
На фиг. 3.1, 3.2, 3.3 са показани графичните зависимости показващи влиянието на оптична мощност на предавателя P_{TX} върху резултатните стойности на Q-фактора (Max. Q Factor), стойността на BER (Min. BER) и стойността на приетата оптична мощност за канал P_{RX} .



Фиг. 3.1. Графична зависимост на BER от промяната на P_{TX} за NRZ модулация



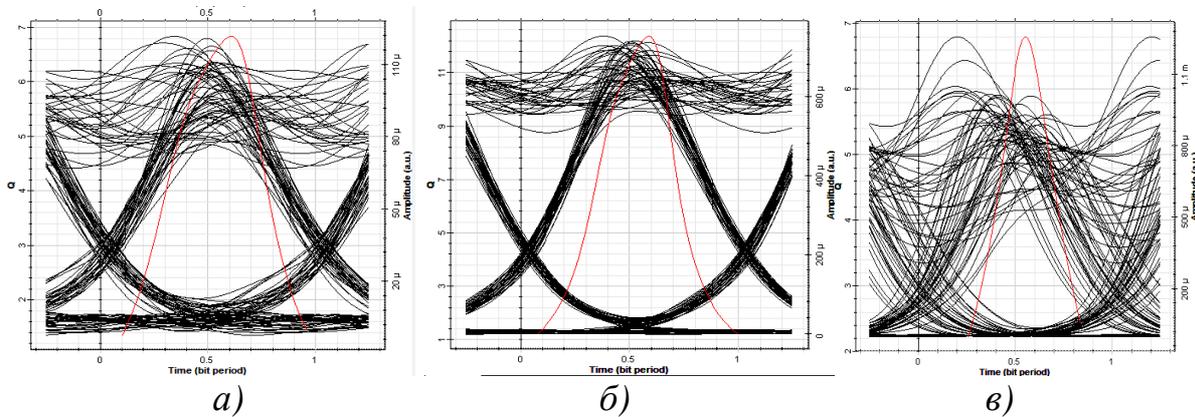
Фиг. 3.2. Графична зависимост на Q-фактора от промяната на P_{TX} за NRZ модулация



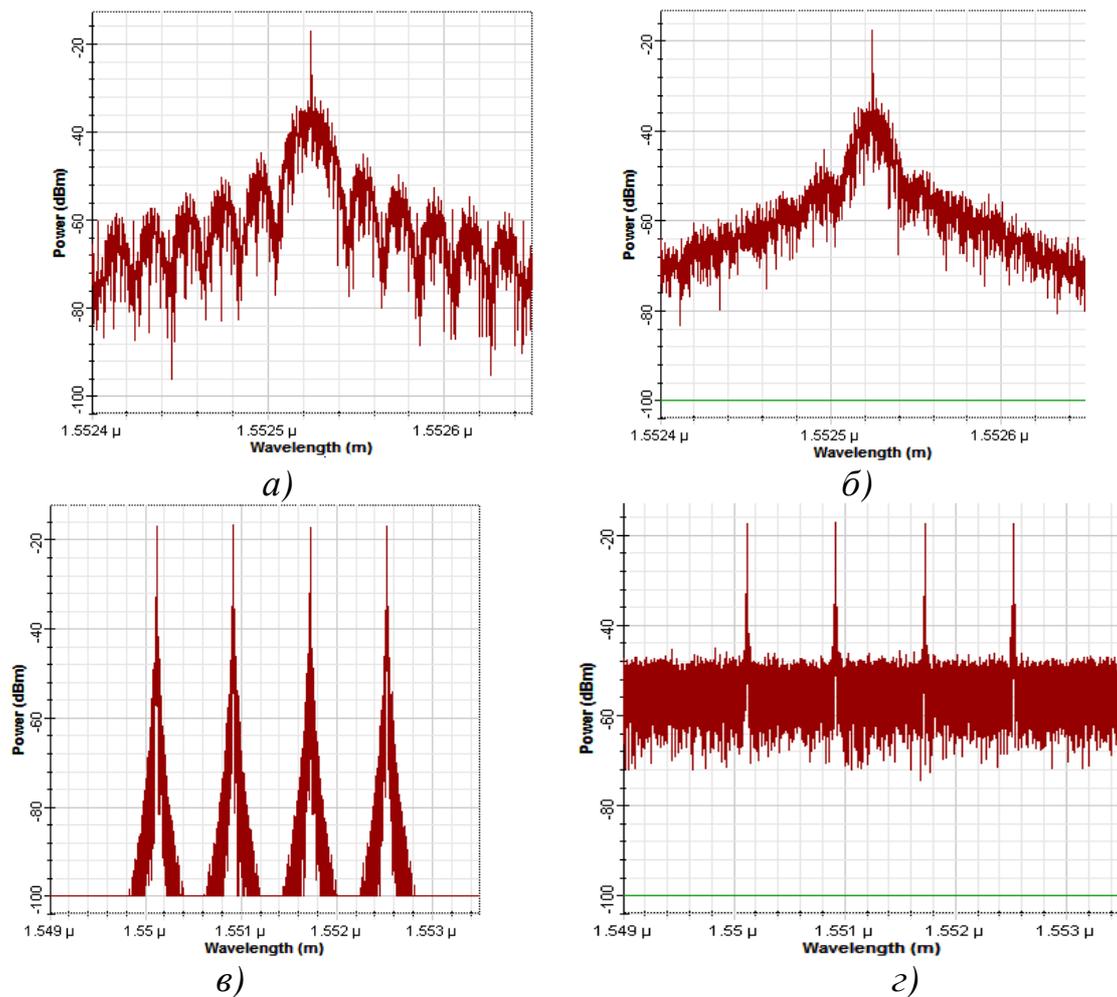
Фиг. 3.3. Графична зависимост на P_{RX} от промяната на P_{TX} за NRZ модулация

3.2.2. Визуализация на характеристиките на оптичните сигнали при промяна на P_{TX} и използване на NRZ модулация

Резултатите от това изследване са представени за три конкретни случая.



Фиг. 3.4. Око-диаграми на оптичния сигнал при NRZ модулация :
 а) $P_{TX\ min} = -10\text{dBm}$, б) $P_{TX\ opt} = 2\text{dBm}$, в) $P_{TX\ max} = 17\text{dBm}$

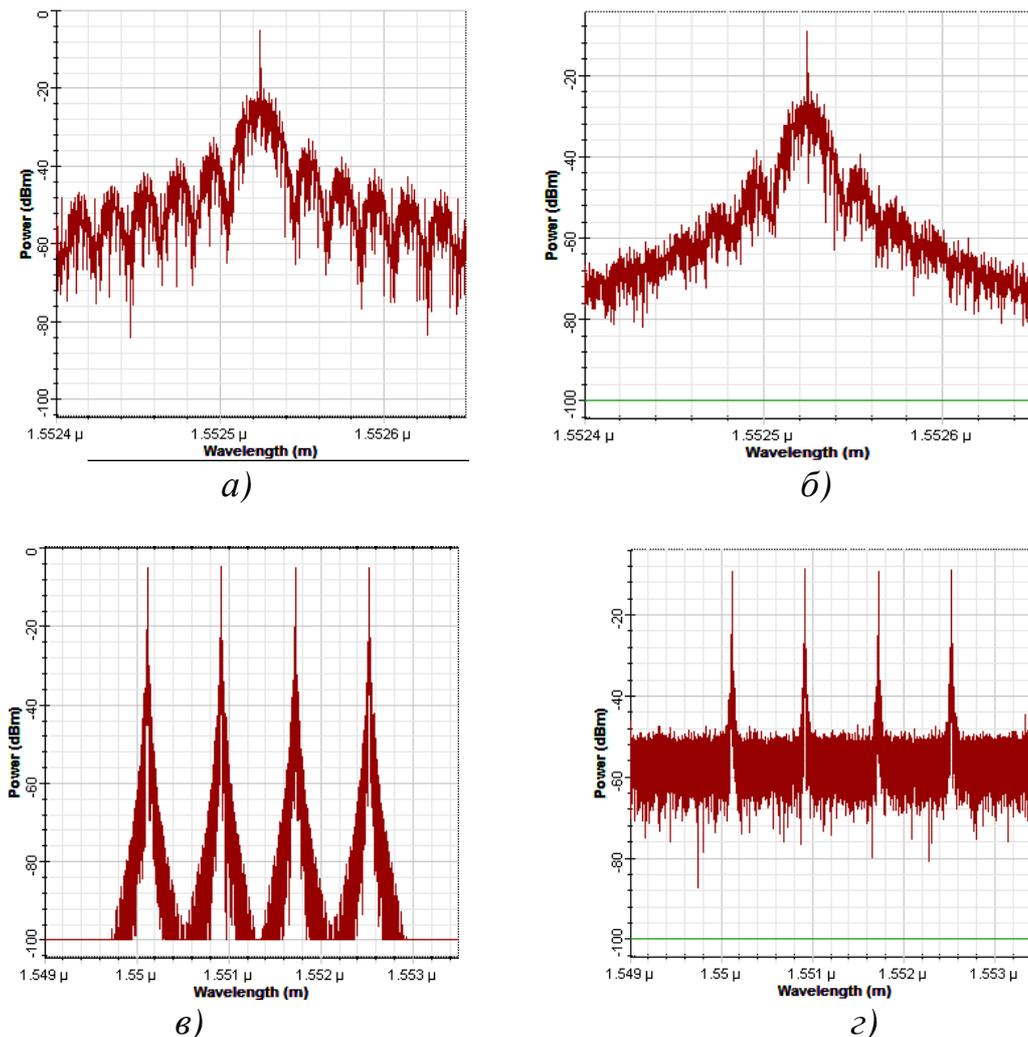


Фиг. 3.5. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ min} = -10\text{dBm}$ на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор

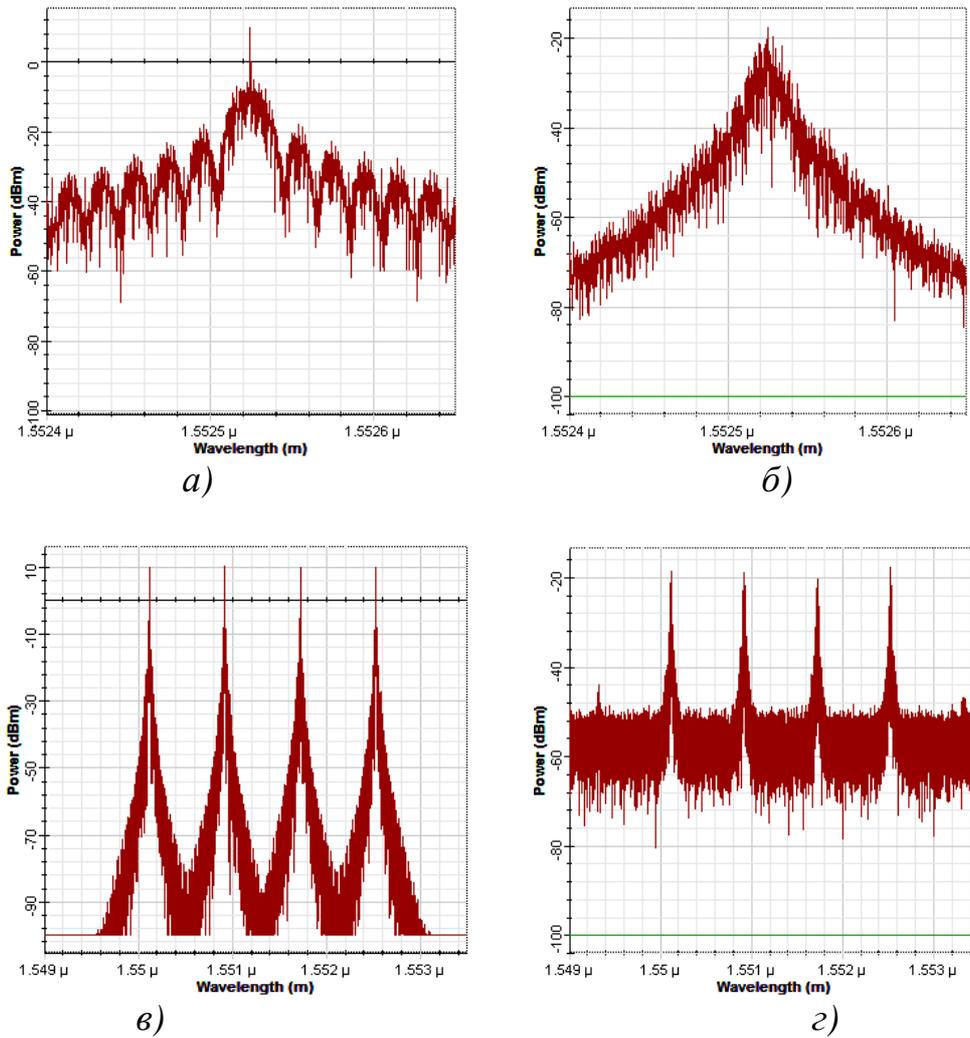
На фиг. 3.4 са илюстрирани резултатните око-диаграми на приетия сигнал, които графично онагледяват неговите цифровите параметри за 3-те основни случая на P_{TX} .

На фиг. 3.5, 3.6 и 3.7 са показани спектрални характеристики на оптичния сигнал за по-важните точки от модела при трите различни случая.

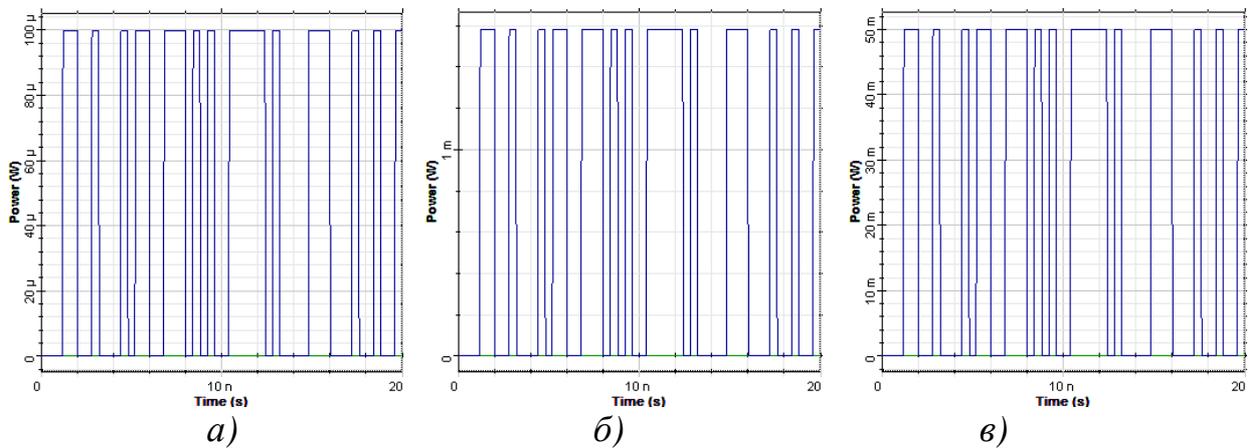
На фиг. 3.8 и 3.9 са показани времевите диаграми на оптичния сигнал за по-важните точки от модела при трите различни случая.



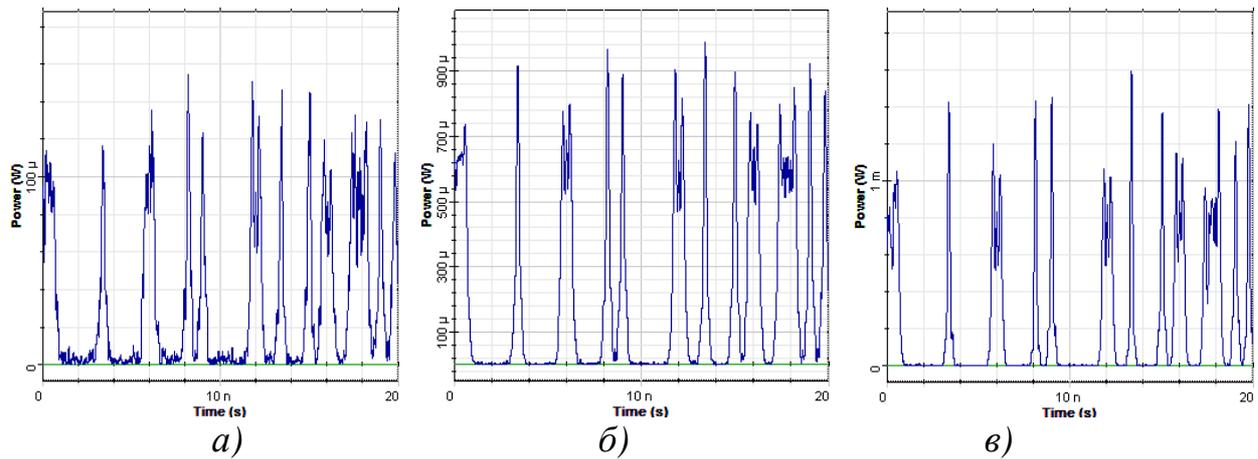
Фиг. 3.6. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX_{opt}} = 2$ dBm на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор



Фиг. 3.7. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ max} = 17$ dBm на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор



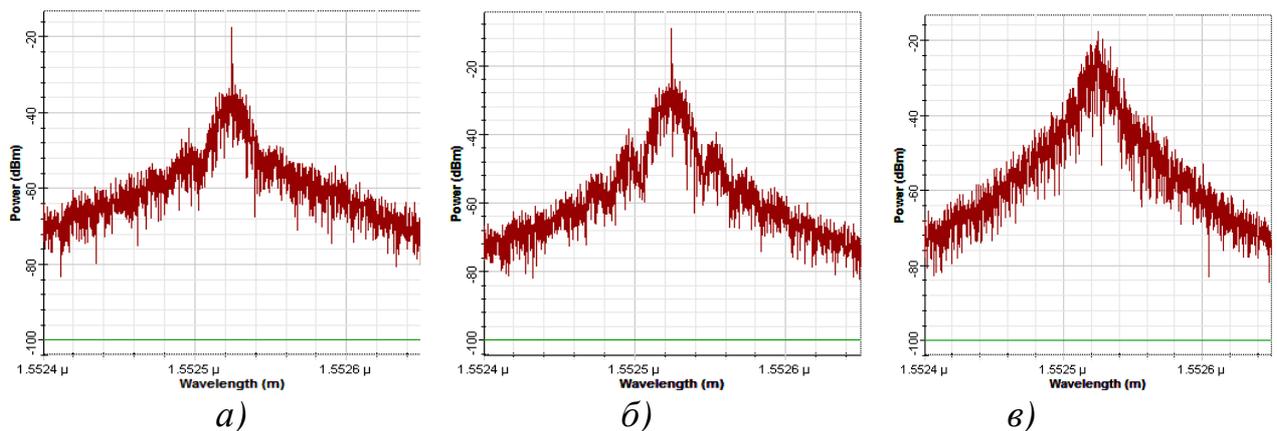
Фиг. 3.8. Времедиаграми на оптичния сигнал на изхода на оптичен предавател при NRZ модулация и а) $P_{TX\ min} = -10$ dBm, б) $P_{TX\ opt} = 2$ dBm, в) $P_{TX\ max} = 17$ dBm



Фиг. 3.9. Времедиаграми на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при NRZ модулация и а) $P_{TX\ min} = -10\text{dBm}$, б) $P_{TX\ opt} = 2\text{dBm}$, в) $P_{TX\ max} = 17\text{dBm}$

3.2.3. Сравнителен анализ на резултатите при NRZ модулация

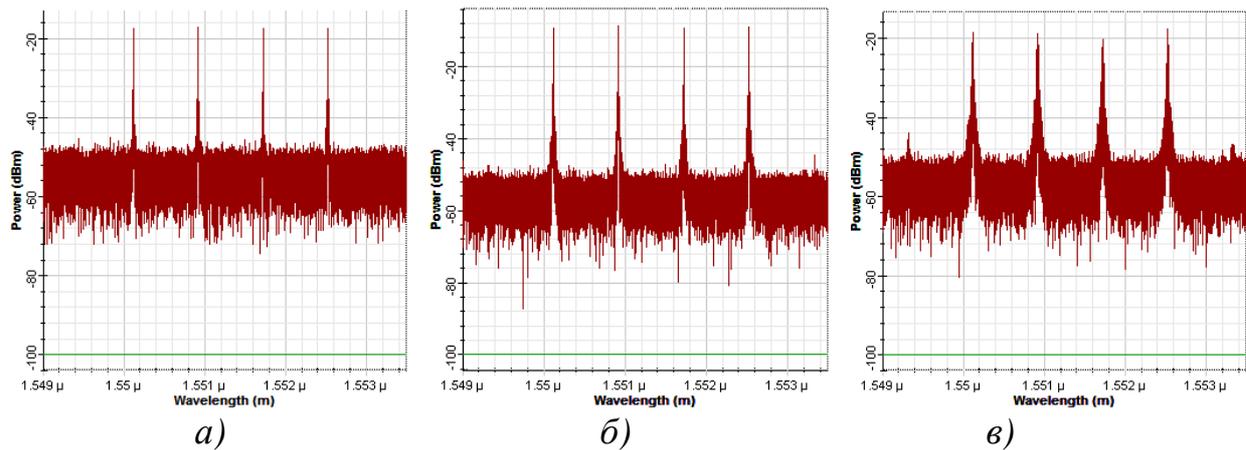
На фиг. 3.10 са представени в обобщен вид спектрални характеристики на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при NRZ модулация за минималната гранична, оптималната и максималната гранична стойност на оптичната мощност на предавателя.



Фиг. 3.10. Спектрални характеристики на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при NRZ модулация за а) $P_{TX\ min} = -10\text{dBm}$, б) $P_{TX\ opt} = 2\text{dBm}$, в) $P_{TX\ max} = 17\text{dBm}$

На фиг. 3.11 са представени съответно спектралните характеристики на мултиплексирания оптичен сигнал на входа на оптичния демултиплексор.

В таблица 3.2 са представени в обобщен вид стойностите на измерените основни параметри, получени за двата гранични ($P_{TX\ min}$ и $P_{TX\ max}$) и за оптималната стойност ($P_{TX\ opt}$) на оптичната мощност на предавателя при NRZ модулация.

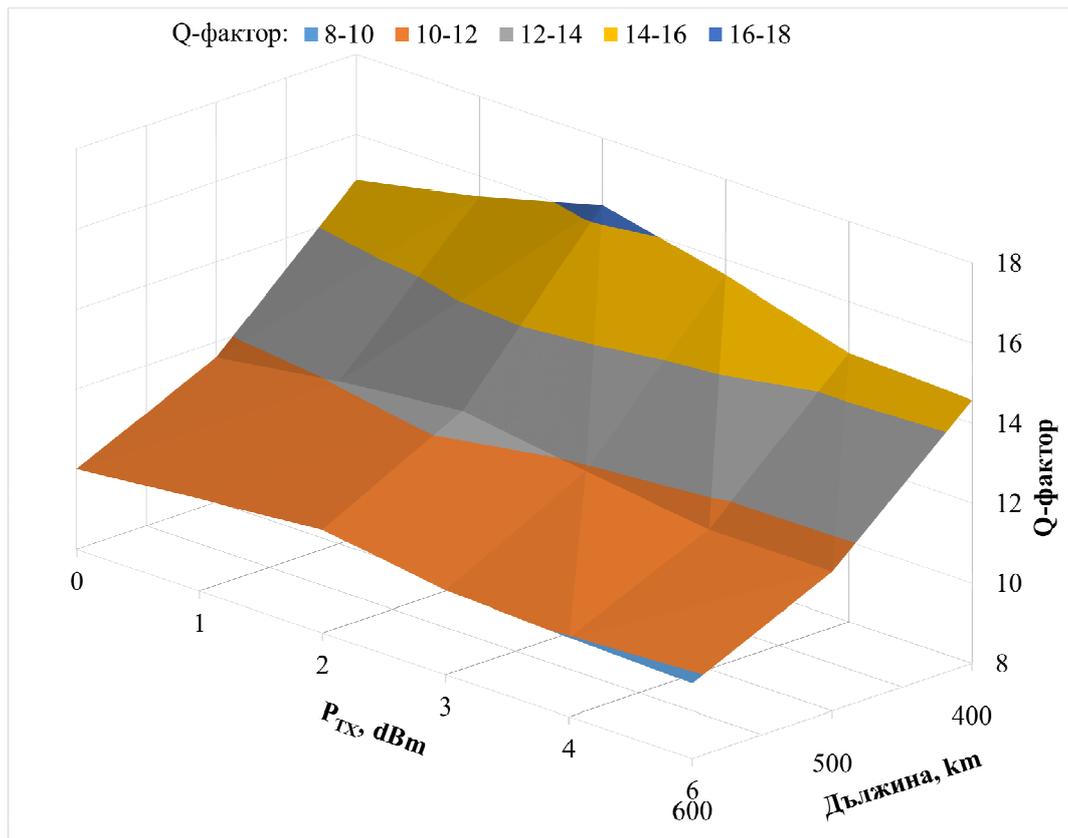


Фиг. 3.11. Спектрални характеристики на мултиплексирания оптичен сигнал на входа на оптичния демултиплексор при NRZ модулация за а) $P_{TX\ min} = -10\text{dBm}$, б) $P_{TX\ opt} = 2\text{dBm}$, в) $P_{TX\ max} = 17\text{dBm}$

Таблица 3.2. Експериментални резултати при промяна на P_{TX} за NRZ модулация

Параметри	$P_{TX\ min} = -10\text{ dBm}$	$P_{TX\ opt} = 2\text{dBm}$	$P_{TX\ max} = 17\text{dBm}$
Мощност P_{RX} , dBm	-13,603	-5,454	-4,876
Средно ниво на шума в един канал, dBm	-80	-83	-84
Средно ниво на шума в мултиплекса, dBm	-53,5	-54,5	-56,2
Време на нарастване на оптичния импулс, ps	0,283	0,409	0,430
OSNR в един канал (вх./ изх.), dBm	73,06 / 12,03	73,06 / 22,03	73,06 / 23,18
Широчина на спектъра на сигнала за канал	80 pm	130 pm	240 pm
Ниво и брой на паразитните дължини на вълната	-	-44,7 dBm x 1 бр.	-44 dBm x 2

Тъй като една от основните цели на представените симулационни модели и реализираните изследвания с тях е да се търси решение на оптимизационна задача – определяне на оптималната оптична мощност на предавателя във функция от стойността на няколко параметъра. На фиг. 3.12 са представени обобщените резултати от проведения многопараметричен анализ.

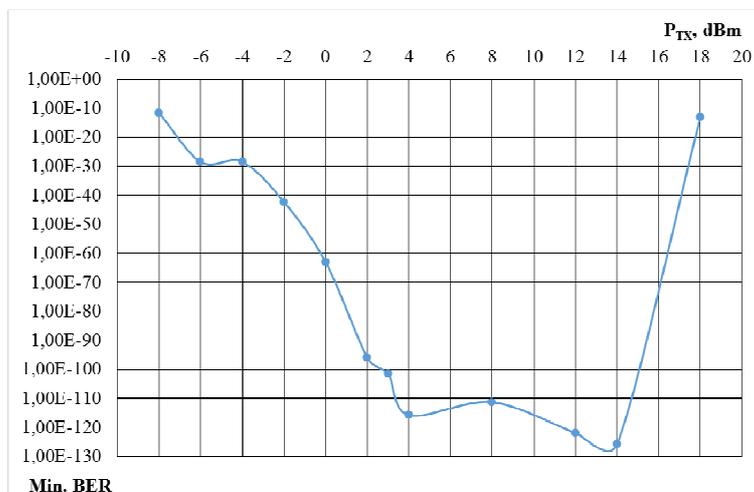


Фиг. 3.12. Графична зависимост на Q-фактора от P_{TX} и дължината на оптичната линия l при NRZ модулация

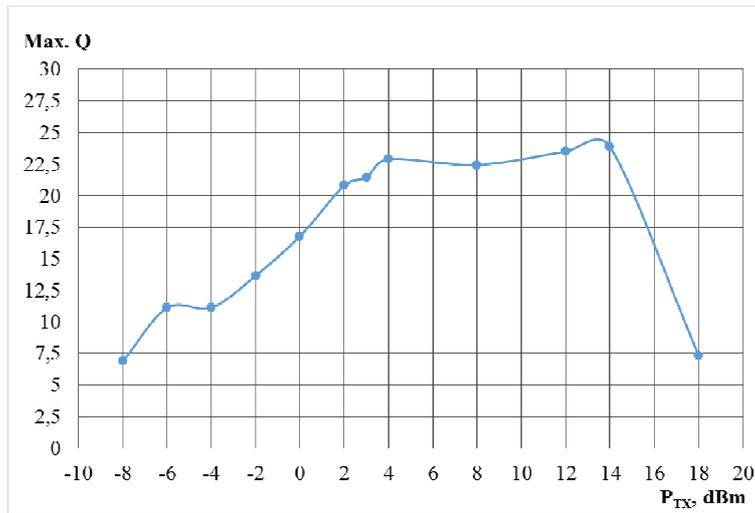
3.3. Изследване и анализ на симулационния модел на 4-канална WDM система при RZ модулация.

3.3.1 Параметричен анализ при промяна на P_{TX} и използване на RZ модулация

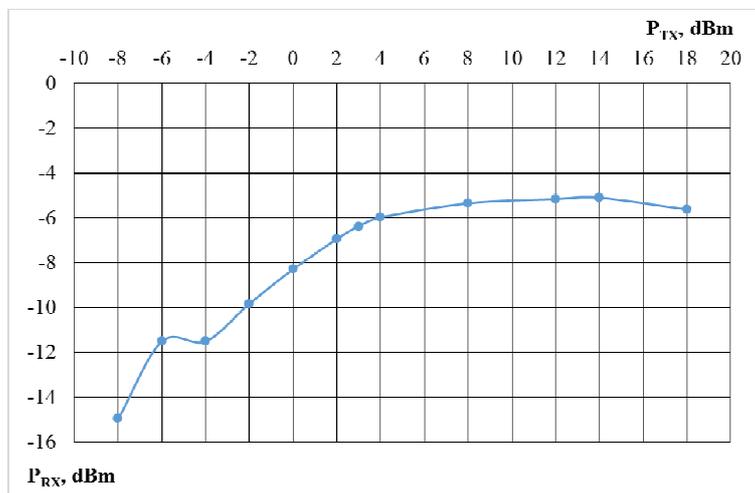
Резултатите от изследването са представени графично на фиг. 3.13, 3.14 и 3.15.



Фиг. 3.13. Графична зависимост на BER от промяната на P_{TX} за RZ модулация



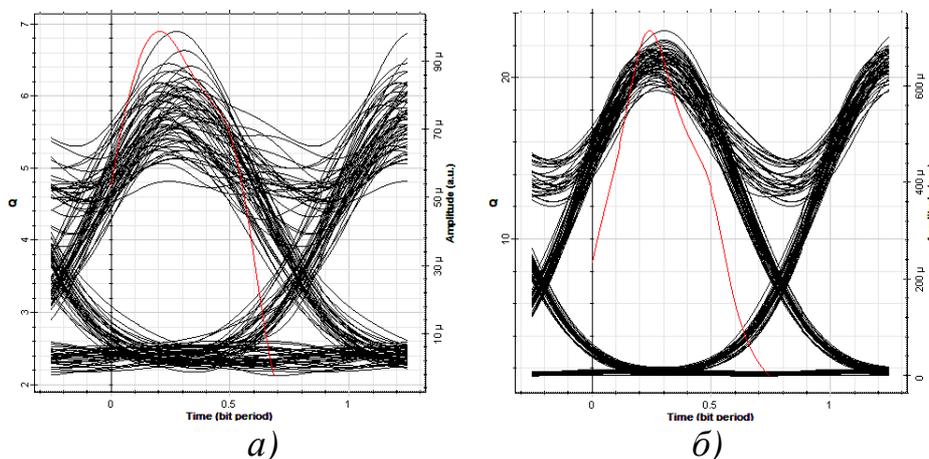
Фиг. 3.14. Графична зависимост на Q-фактора от промяната на P_{TX} за RZ модулация

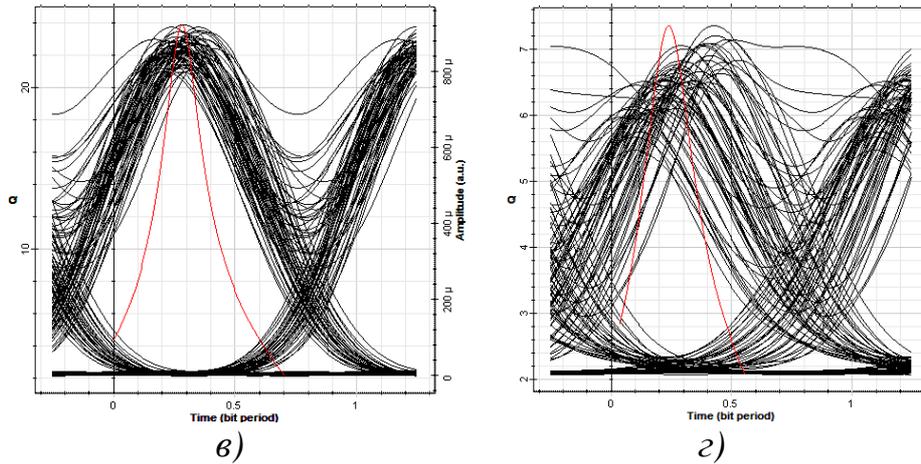


Фиг. 3.15. Графична зависимост на P_{RX} от промяната на P_{TX} за RZ модулация

3.3.2. Визуализация на характеристиките на оптичните сигнали при промяна на P_{TX} и използване на RZ модулация

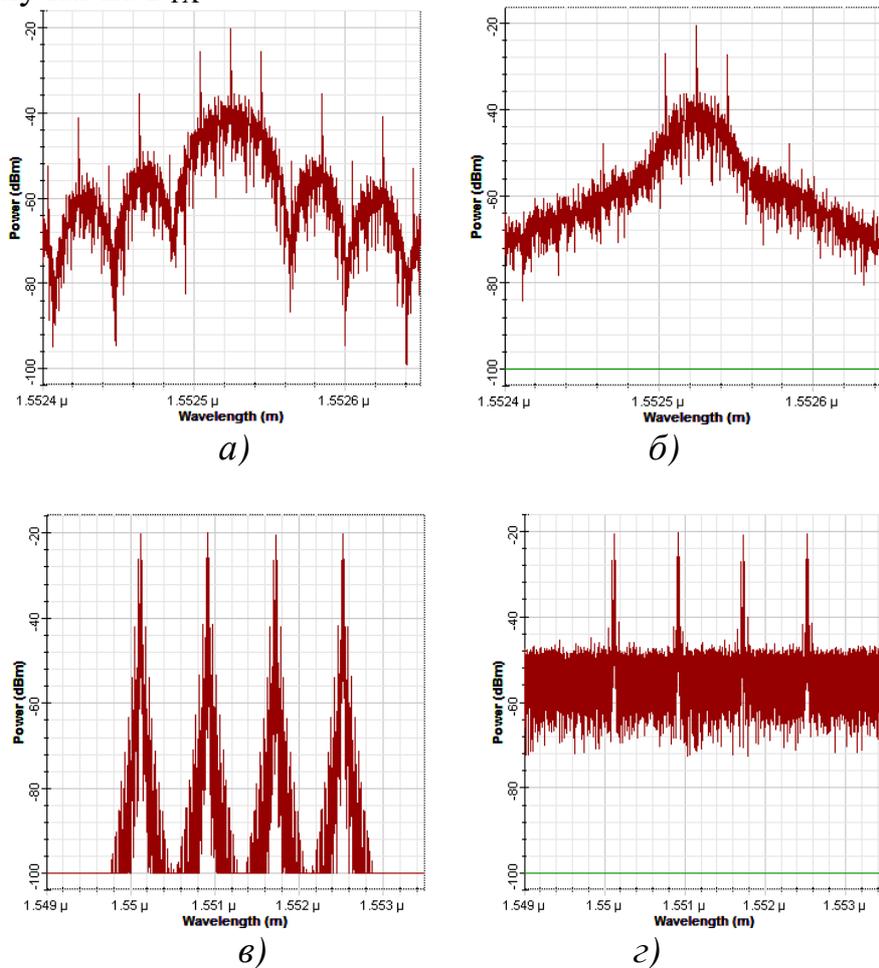
Резултатите от това изследване са представени за три конкретни случая.





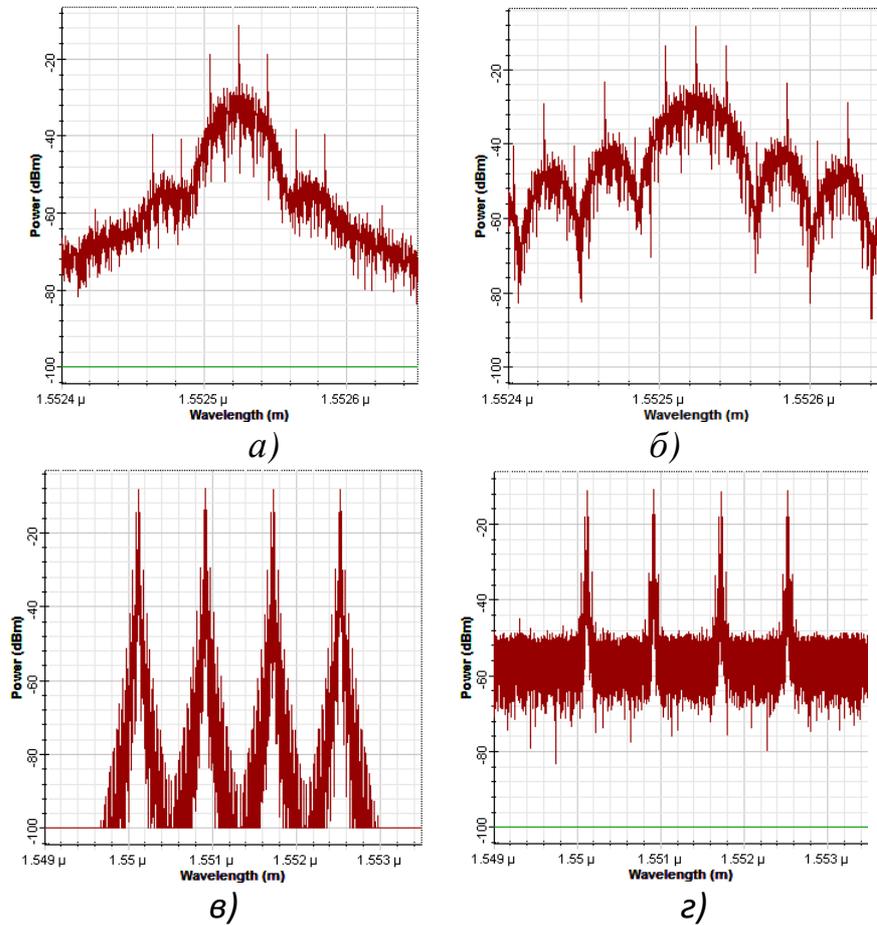
Фиг. 3.16. Око-диаграми на оптичния сигнал при RZ модулация :
 а) $P_{TX\ min} = -8dBm$, б) $P_{TX\ opt1} = 4dBm$, в) $P_{TX\ opt2} = 14dBm$, г) $P_{TX\ max} = 18dBm$

На фиг. 3.16 са илюстрирани резултатните око-диаграми на приетия сигнал, които графично онагледяват неговите цифровите параметри за 4-те основни случая на P_{TX} .

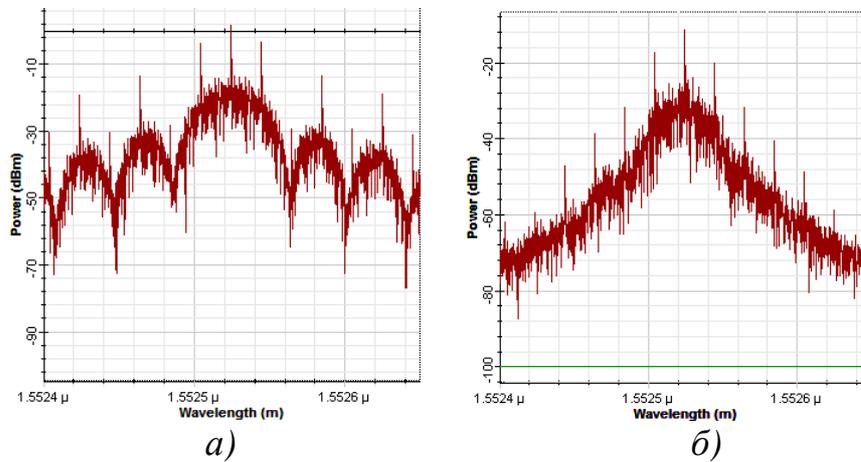


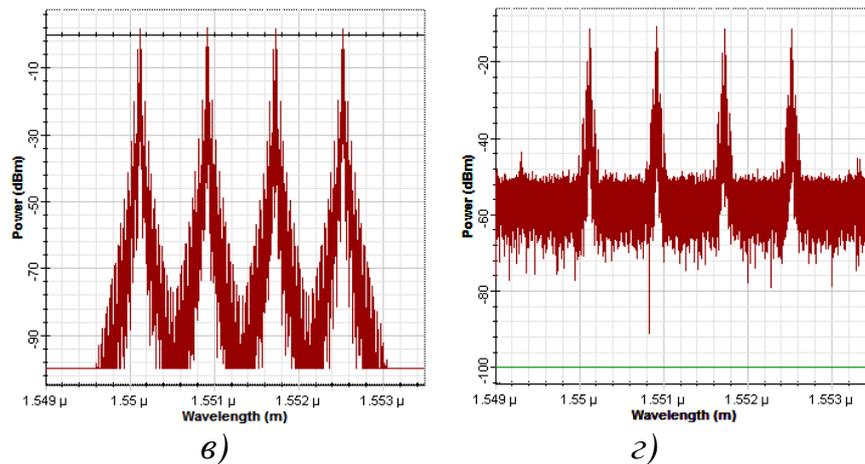
Фиг. 3.17. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ min} = -8\ dBm$ на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор

На фиг. 3.17, 3.18, 3.19 и 3.20 са показани спектрални характеристики на оптичния сигнал за по-важните точки от модела при трите различни случая.

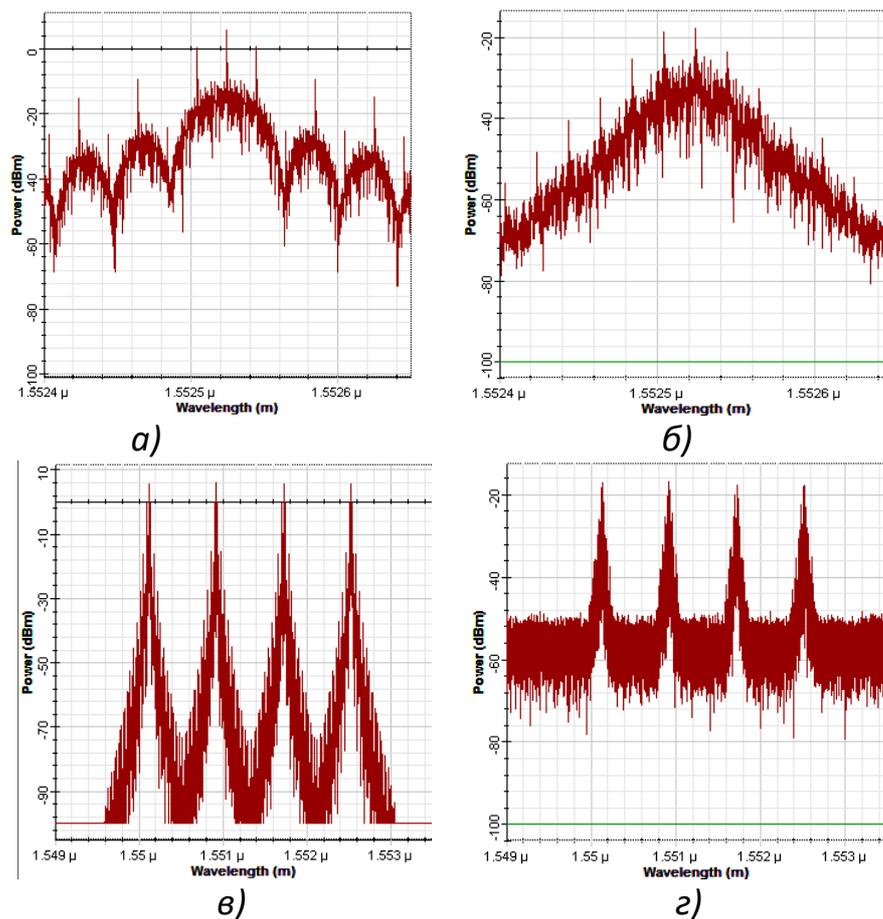


Фиг. 3.18. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ opt1} = 4$ dWm на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор



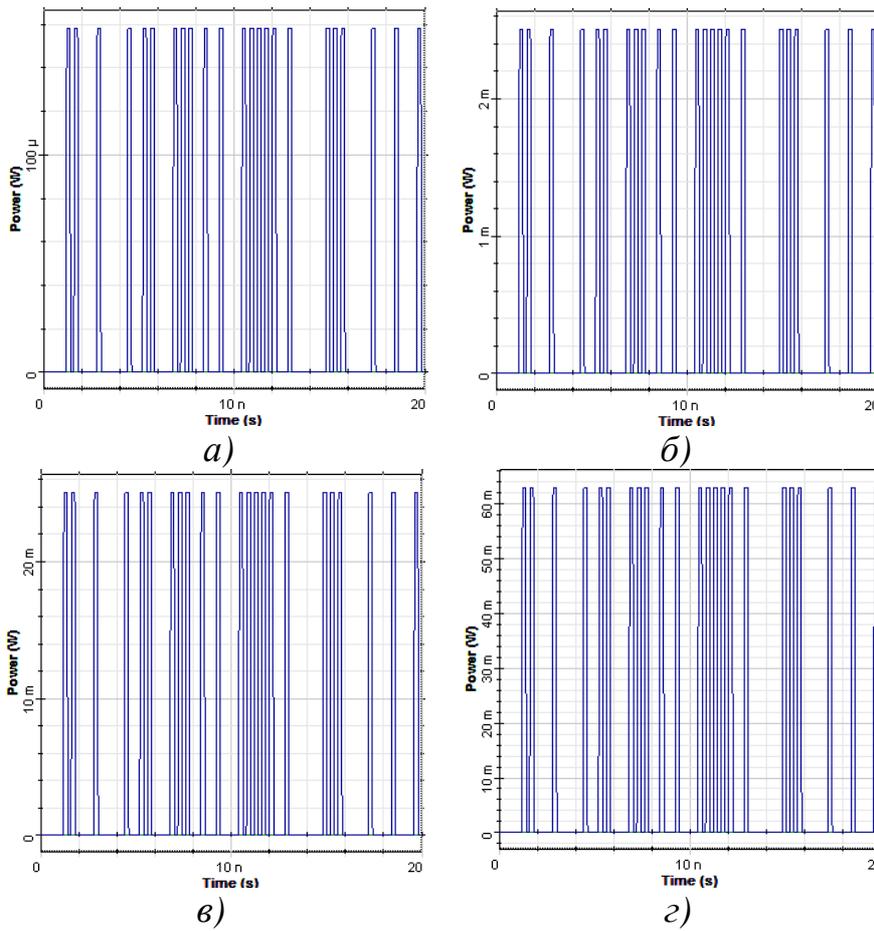


Фиг. 3.19. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ opt2} = 14$ dBm на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор

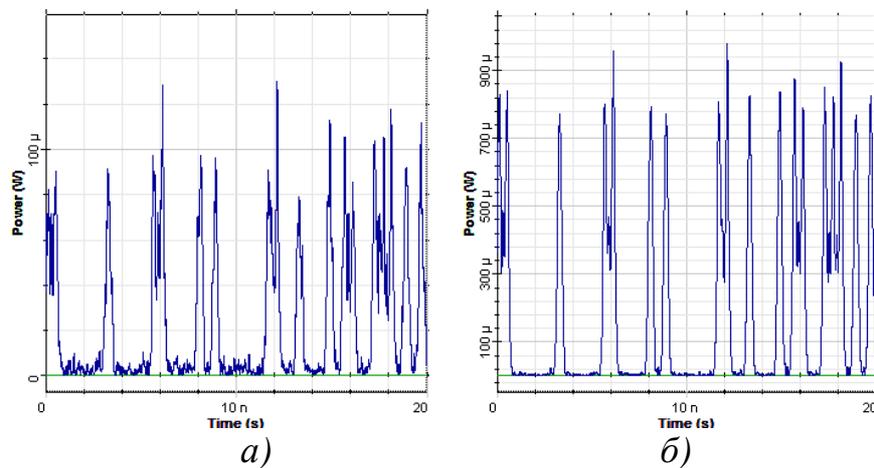


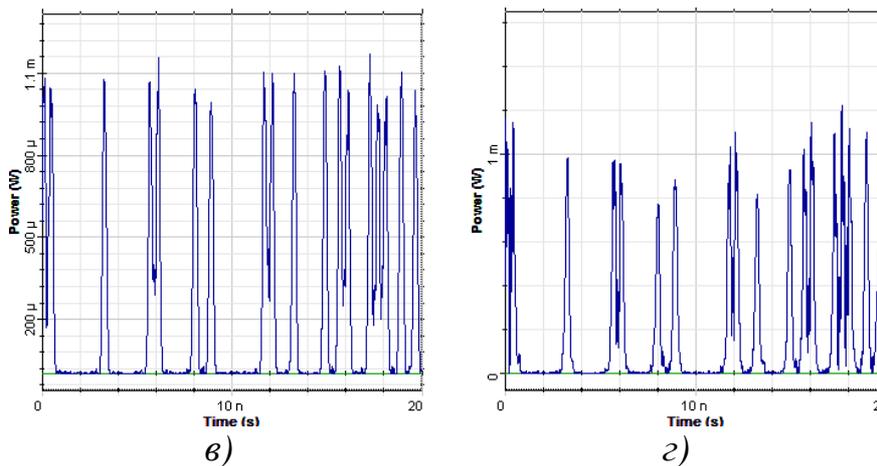
Фиг. 3.20. Спектрални характеристики на оптичния сигнал при $P_{TX\ max} = 18$ dBm на: а) изхода на оптичен предавател, б) входа на оптичен приемник, в) изхода на оптичния мултиплексор и г) входа на оптичния демултиплексор

На фиг. 3.21 и 3.22 са показани времедиаграмите на оптичния сигнал за по-важните точки от модела при трите различни случая.



Фиг. 3.21. Времедиаграми на оптичния сигнал на изхода на оптичен предавател при RZ модулация и а) $P_{TX\ min} = -8\ dBm$, б) $P_{TX\ opt1} = 4\ dBm$, в) $P_{TX\ opt2} = 14\ dBm$, г) $P_{TX\ max} = 18\ dBm$





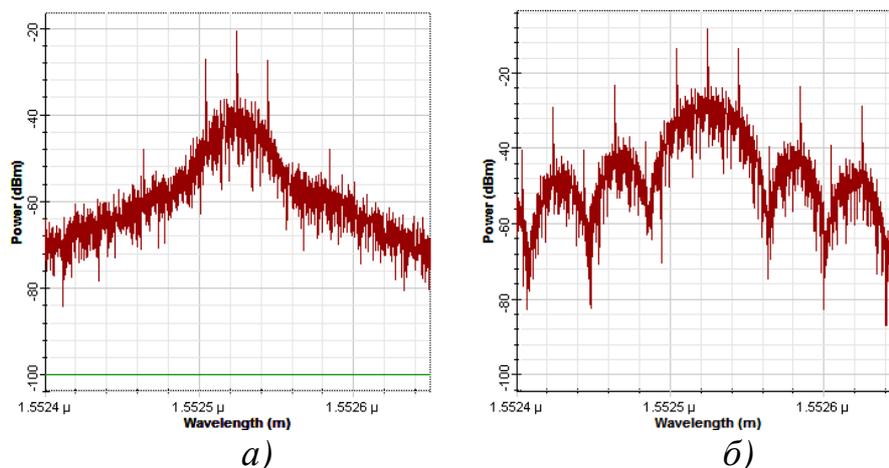
Фиг. 3.22. Времедиаграми на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при RZ модулация и а) $P_{TX\ min} = -8\ dBm$, б) $P_{TX\ opt1} = 4\ dBm$, в) $P_{TX\ opt2} = 14\ dBm$, г) $P_{TX\ max} = 18\ dBm$

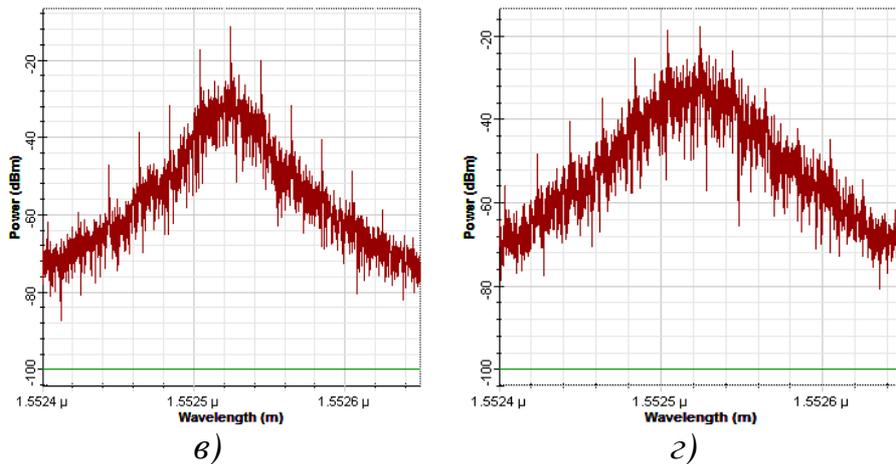
3.3.3. Сравнителен анализ на резултатите при RZ модулация

Към представеното на фиг. 3.21 и фиг. 3.22 сравнение в параметрите и формата на времедиаграмите на оптичния сигнал при RZ модулация и различни нива на оптичната мощност на предавателя, може да се направи подобно обобщено сравнение и по отношение на спектралните характеристики на оптичния сигнал както за един от каналите, така и за общия мултиплексирания сигнал.

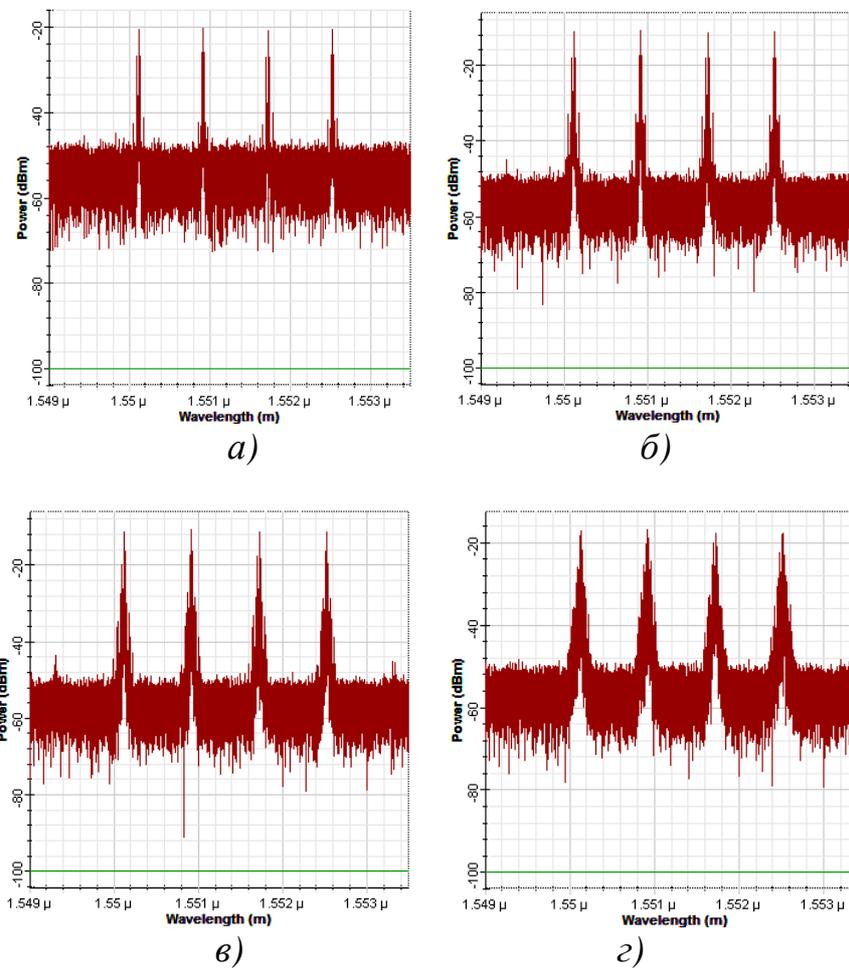
На фиг. 3.23 са представени в обобщен вид спектрални характеристики на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при NRZ модулация за минималната гранична, оптималната и максималната гранична стойност на оптичната мощност на предавателя.

На фиг. 3.24 са представени съответно спектралните характеристики на мултиплексирания оптичен сигнал на входа на оптичния демултиплексор.





Фиг. 3.23. Спектрални характеристики на оптичния сигнал на входа на оптичен приемник при RZ модулация за: а) $P_{TX\ min} = -8\ dBm$, б) $P_{TX\ opt1} = 4\ dBm$, в) $P_{TX\ opt2} = 14\ dBm$, з) $P_{TX\ max} = 18\ dBm$



Фиг. 3.24. Спектрални характеристики на мултиплексирания оптичен сигнал на входа на оптичния демултиплексор при RZ модулация за: а) $P_{TX\ min} = -8\ dBm$, б) $P_{TX\ opt1} = 4\ dBm$, в) $P_{TX\ opt2} = 14\ dBm$, з) $P_{TX\ max} = 18\ dBm$

На базата на анализ на представените на фиг. 3.21 до фиг. 3.24 времеви и спектрални характеристики, в таблица 3.5 са представени в обобщен вид

стойностите на измерените основни параметри, получени за двата гранични ($P_{TX\ min}$ и $P_{TX\ max}$) и за двете оптимални стойности ($P_{TX\ opt1}$ и $P_{TX\ opt2}$) на оптичната мощност на предавателя при RZ модулация.

Таблица 3.5. Експериментални резултати при промяна на P_{TX} за RZ модулация

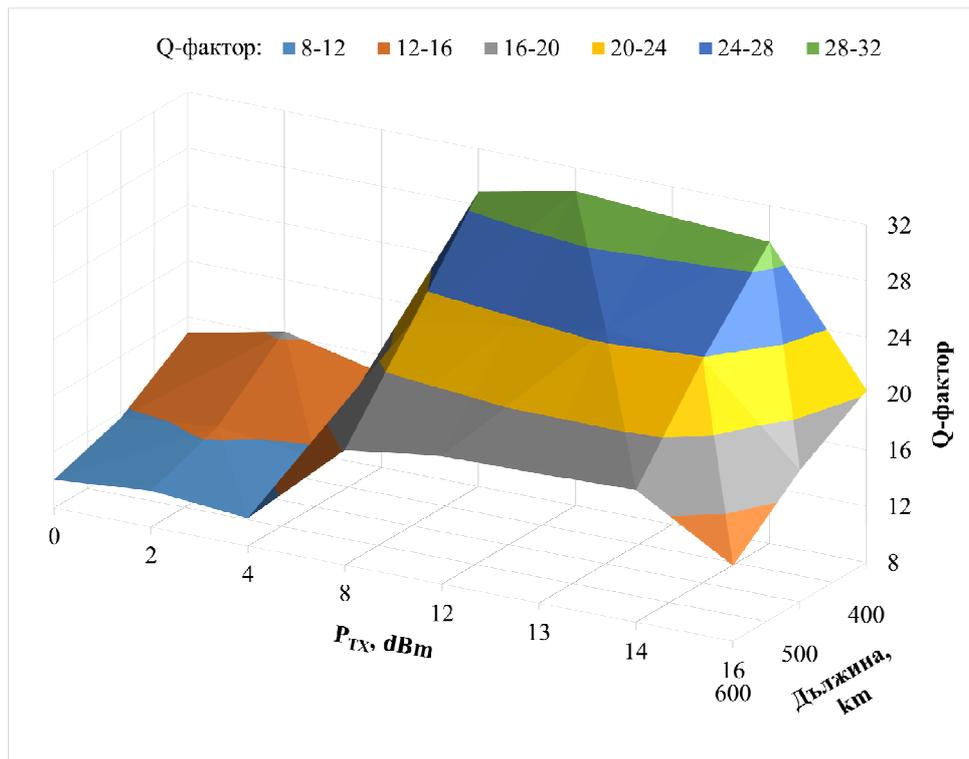
Параметри	$P_{TX\ min} = -8$ dBm	$P_{TX\ opt1} = 4$ dBm	$P_{TX\ opt2} = 14$ dBm	$P_{TX\ max} = 18$ dBm
Мощност P_{RX} , dBm	-4,953	-5,977	-5,094	-5,62
Средно ниво на шума в един канал, dBm	-80,23	-82,35	-83,26	-82,96
Средно ниво на шума в мултиплекса, dBm	-53,50	-55,81	-56,01	-56,13
Време на нарастване на оптичния импулс, ns	0,297	0,308	0,335	0,377
OSNR в един канал (вх./изх.), dBm	66,84 / 10,77	66,84 / 21,46	66,84 / 23,02	66,84 / 22,87
Широчина на спектъра на сигнала за канал	80 pm	150 pm	200 pm	290 pm
Ниво и брой на паразитните дължини на вълната	-	-45,39 x 1	-44,09 x 2	-

По аналогичен начин и тук, в таблица 3.5 и на фиг. 3.25, са представени обобщените резултати от проведения многопараметричен анализ с основна цел определяне на оптималната оптична мощност на предавателя във функция от стойността на няколко параметъра,.

Основният критерий за оценка на параметрите на оптичния сигнал е приет да бъде Q-фактора, като се търси неговият максимум. От представените резултати в таблица 3.6 и на фиг. 3.25 се вижда, че $Q_{max} = 30,347$ и това се постига при дължина на оптичната линия 400 km и $P_{TX} = 12$ dBm.

Таблица 3.6. Експериментални резултати от многопараметричен анализ $Q = f(P_{TX}, l)$ при RZ модулация

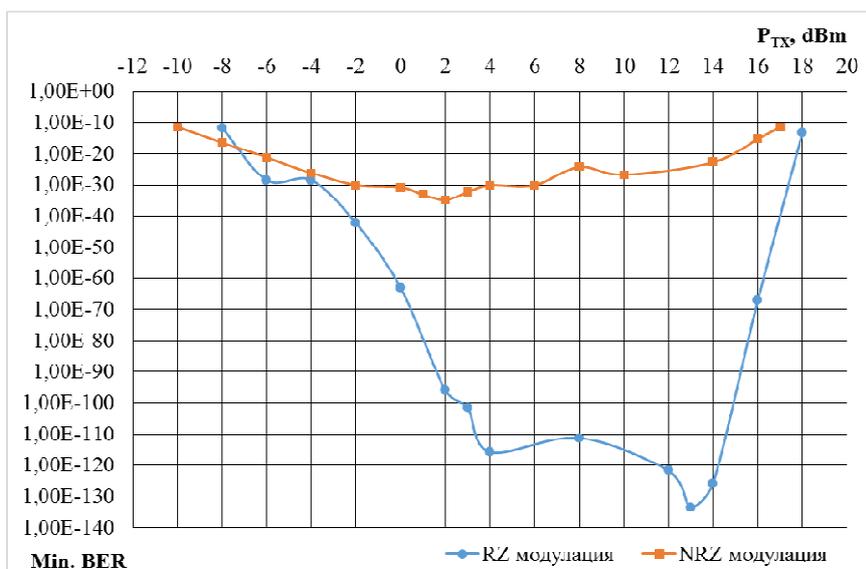
Q-фактор		Дължина (l), km		
		400	500	600
P_{TX} , dBm	0	14,858	11,612	10,005
	2	16,324	12,369	10,582
	4	14,709	11,492	9,978
	8	28,954	22,443	16,173
	12	30,347	23,494	17,087
	13	29,84	24,615	17,184
	14	29,438	23,876	17,383
	16	20,228	17,344	13,354



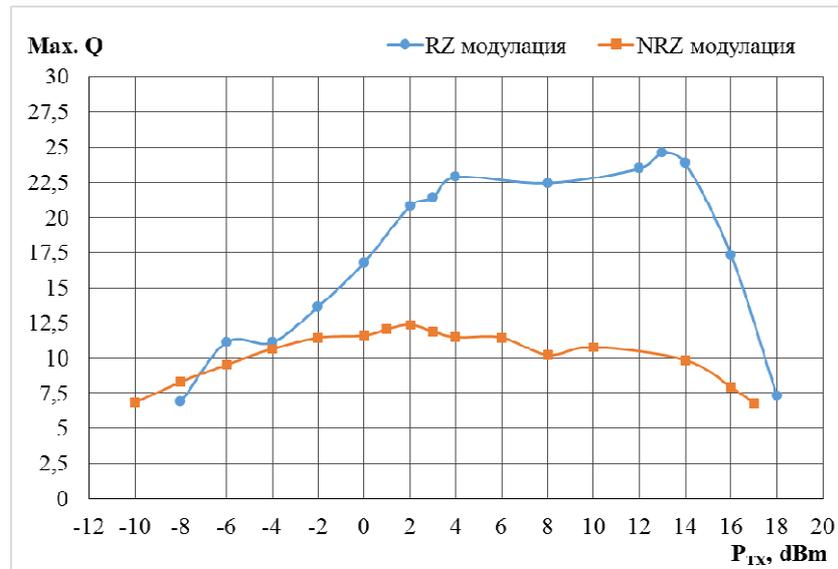
Фиг. 3.25. Графична зависимост на Q-фактора от P_{TX} и дължината на оптичната линия l при RZ модулация

3.4. Сравнителен анализ между резултатите получени при изследване на двата вида модулация NRZ и RZ

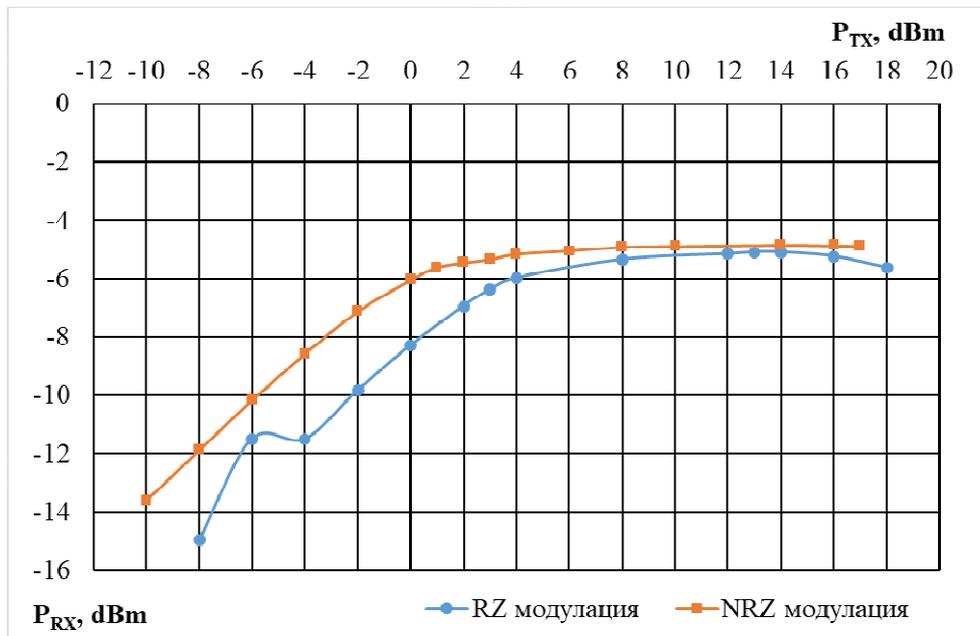
На фиг. 3.26 до фиг. 3.28 са представени сравнителни графични зависимости на основните качествени показатели с цел сравнение при използване RZ и на NRZ модулация.



Фиг. 3.26 Сравнителна графична зависимост между P_{TX}, dBm и Min. BER



Фиг. 3.27. Сравнителна графична зависимост между P_{TX} , dBm и Max. Q Factor



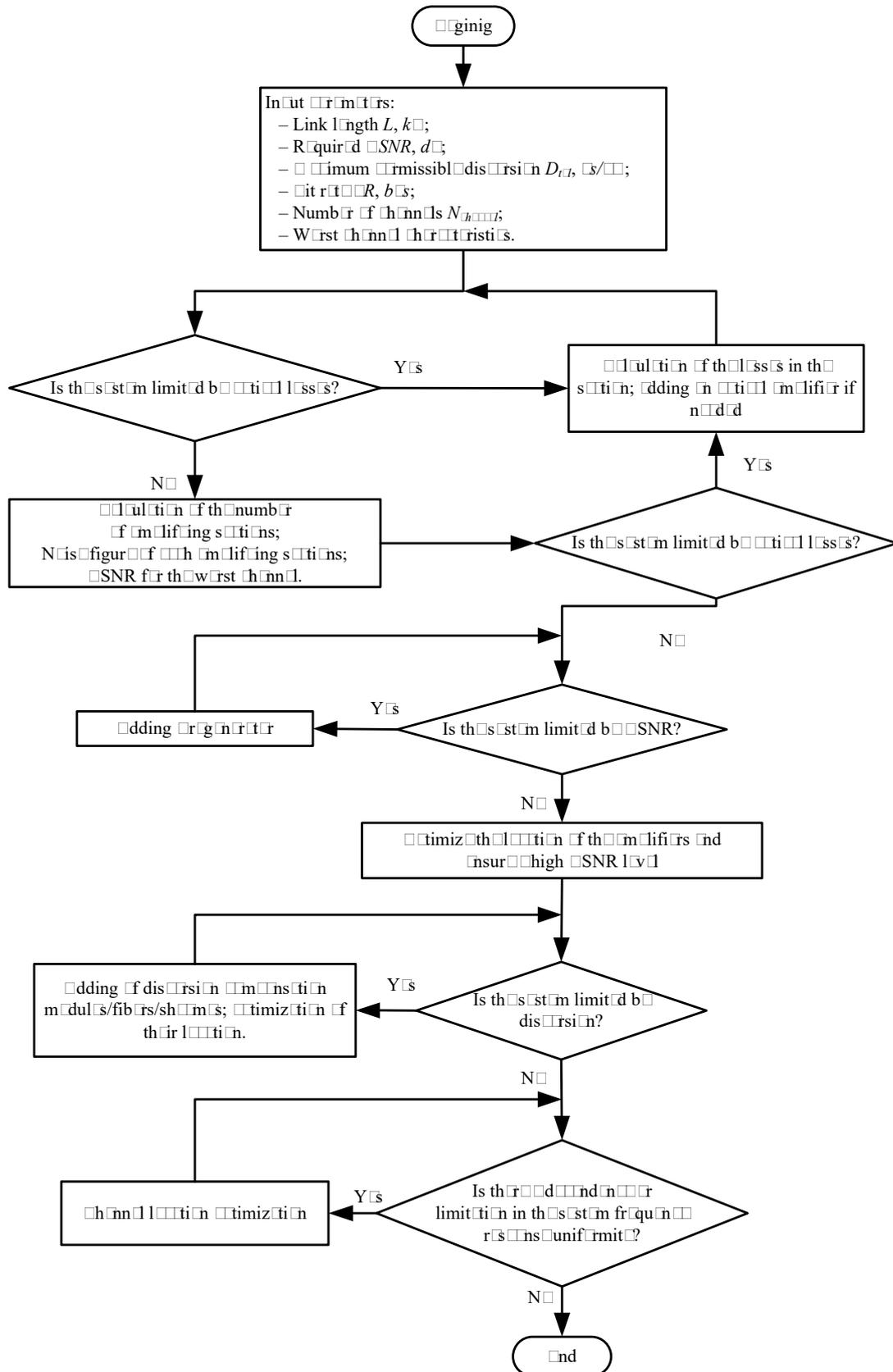
Фиг. 3.28. Сравнителна графична зависимост между P_{TX} и P_{RX} , dBm

Както може да се види от фиг. 3.26 и фиг. 3.27, при използване на RZ модулация се постигат много по-добри стойности на BER (най-голям минимум), респективно на Q-фактора (най-голям максимум) и то в широк интервал на изменение на входната оптична мощност P_{TX} .

3.5. Синтез на алгоритъм за оптимално планиране и оптимизация на параметрите на многоканална оптична комуникационна линия

Въз основа на разгледаните характеристики и проведените изследвания и анализ, на фиг. 3.29 е представен разработен алгоритъм за оптимално планиране и оптимизиране на параметрите на многоканална

оптична комуникационна линия със спектрално мултиплексиране на сигналите.



Фиг. 3.29. Алгоритъм за оптимизация на оптични линии за връзка в WDM оптични комуникационни мрежи

3.6. Изводи към Глава 3

1. Разработените симулационни модели предлагат удобен и лесен анализ и решаване на оптимизационни задачи при проектиране и анализ на поведението на оптични мрежи със спектрално мултиплексиране.
2. Използването на RZ модулация осигурява по-добри параметри на сигнала – минимална стойност на BER и максимален Q-фактор за широк диапазон на оптичната мощност на оптичния предавател, в сравнение с използването на NRZ модулация.
3. Независимо от по-добрите параметри, при използване на RZ модулация се получават по-лоши времеви и спектрални характеристики – по-голямо ниво на междусимволна интерференция и по-широки спектри с по-големи нива на страничните ленти в сравнение с NRZ модулацията.
4. Влошаването на оптичните сигнали е причинно свързано с амплитудното затихване и с дисперсионното разширяване на кодовите импулси. Негативните ефекти и от двата процеса, както и другите нелинейни ефекти и смущения имат нарастващи с дължината на линията и броя оптични канали количествени изражения.
5. Нелинейните изкривявания в оптичните влакна се дължат на няколко явления, които възникват при недопустимо високи нива на предаваните сигнали. Те могат да бъдат разделени в две групи – нелинейности, свързани с разсейването на оптична мощност и нелинейности, свързани с ефекта на Кер.
6. Нелинейните ефекти свързани с фазова самомодулация и четиривълново смесване са изключително характерни и оказват голямо влияние върху оптичните системи със спектрално мултиплексиране на сигналите.
7. Ефектите свързани с разсейване на светлината се характеризират с прагово ниво, което е силно чувствително към дължината на оптичната линия.
8. Ако средната оптична мощност въведена във влакното се поддържа постоянна, оптичният RZ импулс с коефициент на запълване 50% ще има два пъти по-висока пикова стойност на мощността от тази на NRZ импулс. Тъй като RZ импулсът има по-широка оптична лента в сравнение с NRZ импулса, той е по-засегнат от влиянието на дисперсията във влакното;
9. Високата оптична плътност в сърцевината на влакното води до появата на нелинейни ефекти. RZ импулсите имат по-голям пикова мощност и като такива са по-податливи на FWM, SPM и XPM. В присъствието на SPM, обаче, тези импулси могат да претърпят компресия (солитони) и да бъдат по-ефективни от NRZ импулсите;
10. Най-добрият формат на модулация при наличието на нелинейни ефекти зависи от ефекта на схемата за управление на дисперсията, тъй като от

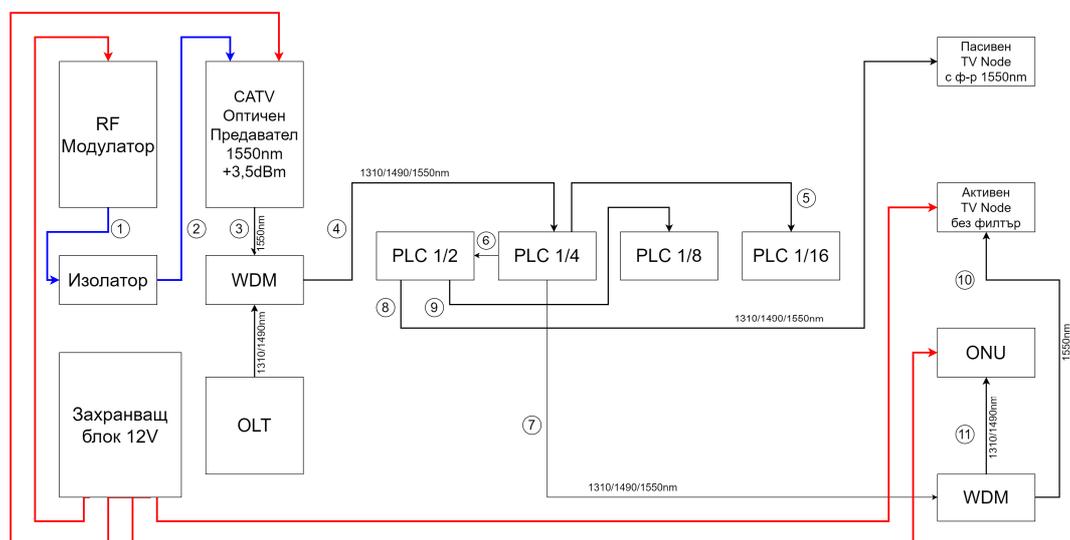
дисперсията причинява разсейване на енергията на един импулс във времето;

11. RZ модулираните сигнали са по-устойчиви на PMD от NRZ кодираните, защото енергията се ограничава до центъра на периода на битовете;
12. Чрез резултатите се доказва, че при RZ-базираните модуляции оптичните сигнали осигуряват по-добра основна чувствителност на приемника, когато средната мощност във влакното се поддържа постоянна;
13. Основен недостатък при използване на RZ модулация е генерирането на значителни странични листи в оптичните спектрални характеристики на сигналите.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИПЛЕКСИРАНИ ОПТИЧНИ СИГНАЛИ В ПАСИВНА ОПТИЧНА МРЕЖА

4.1. Разработка на блокова схема на експериментален стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа

На фиг. 4.1 е показана блоковата схема на концепция (идеен проект) за реализацията на практически модел на експериментален стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON), която да позволява провеждането на научни изследвания, решаване на оптимизационни задачи и обучение на студенти и технически персонал.



Фиг. 4.1. Блокова схема на експериментален стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON)

Както се вижда от фиг. 4.1, моделът се състои от три канала:

- прав канал на 1550 nm (DS@1550nm) за предаване на разпръсквателни услуги, в частност на телевизия;

- прав канал на 1310 nm (DS@1310nm) за предаване в права посока (даунлоуд) на данни, в частност IP-пакети (доставка на Интернет);
- обратен канал на 1490 nm (US@1490nm) за предаване в обратна посока (ъплоуд) на данни, в частност IP-пакети (доставка на Интернет);

Трите канала са спектрално мултиплексирани като мултиплексирането се извършва на два етапа. На първия етап чрез вградени SFP приемо-предавателен модул в OLT, който излъчва на 1490 nm и приема сигнала от ONU на 1310 nm, се извършва мултиплексирането и едновременното двупосочно предаване на дължини на вълната 1490nm и на 1310nm по едно оптично влакно. На втория етап общият оптичен сигнал 1490/1310 nm се мултиплексира с дължина на вълната 1550 nm, което от страната на главната станция се извършва чрез WDM филтър, а от страната на абонатите – от DWM филтър или същия, който е вграден в крайните клиентски устройства.

4.3. Разработка и изследване на симулационен модел на мултиплексирани оптични сигнали в PON мрежа

Целта на този симулационен модел е да се изследват различни варианти на конфигурация на оптичната мрежа:

- При различни мощности на въведената от оптичния предавател мощност в оптичното влакно;
- При различни дължи на оптичната линия;
- При комбинация от входни параметри в търсене на оптимални настройки на мрежата.

4.3.1. Симулационно моделиране на мултиплексирани оптични сигнали в PON мрежа

На базата на показаната на фиг. 4.1 блокова схема на пасивна оптична мрежа, на фиг. 4.17 е показан разработен симулационен модел на мултиплексирани оптични сигнали в PON мрежа

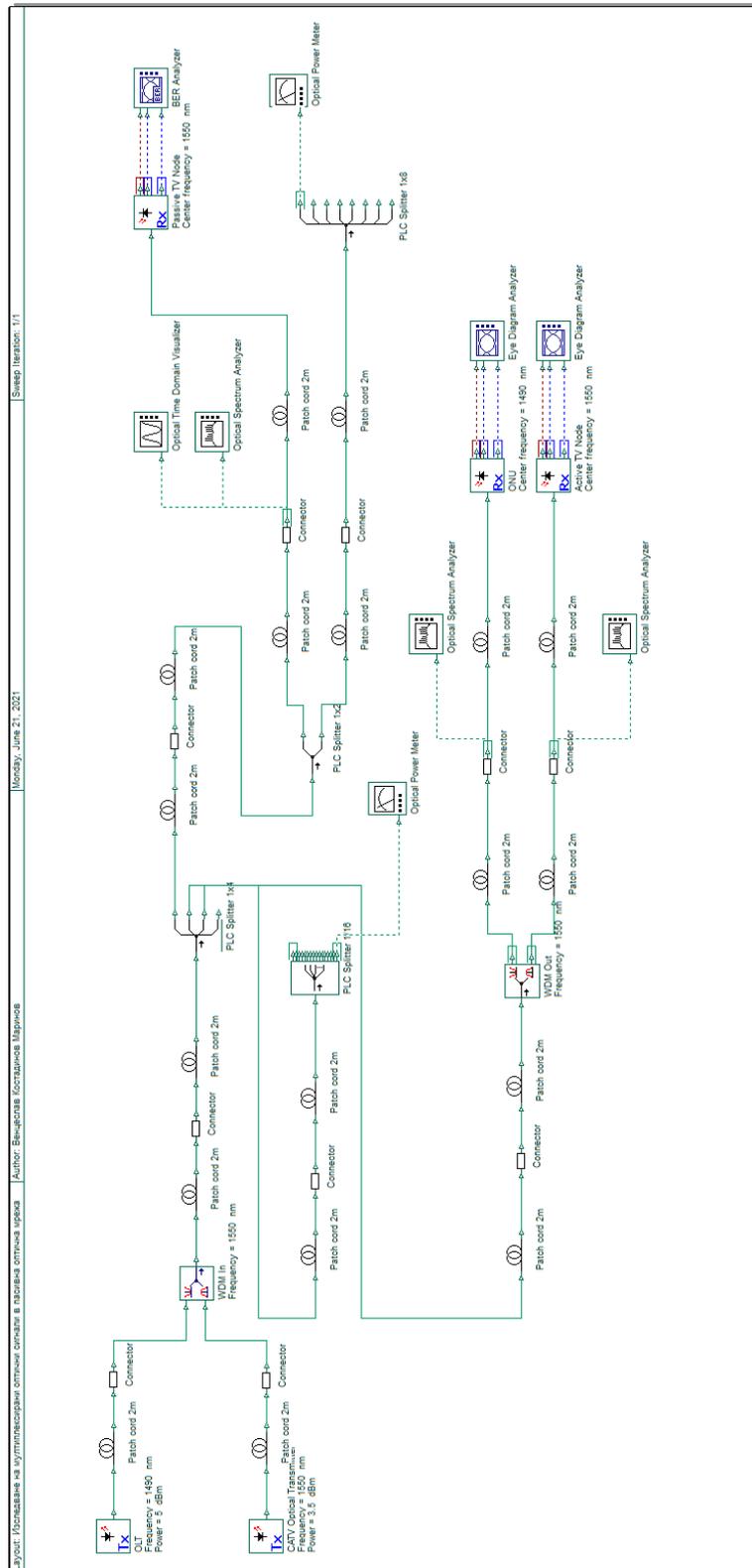
Симулационният модел се състои от три канала:

- два канала в права посока (DS) – един за предаване на разпръсквателни услуги (като например телевизионно съдържание) и за предаване на IP данни в права посока (даунлоуд);
- един канал в обратна посока (US) – за предаване на IP данни в обратна посока (ъплоуд)

Каналите в права посока са с дължини на вълната 1550 nm и 1310 nm, каналът в обратна посока – на 1490 nm.

Правият канал на дължина на вълната 1550 nm е формиран от следните блокове:

- Блок оптичен предавател SATV Optical Transmitter ;
- Свързващи оптични влакна Patch cord;
- Блок оптичен приемник Active TV Node.



Фиг. 4.17. Симуляционен модел на стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON)

Обратният канал на дължина на вълната 1310 nm е формиран от следните блокове:

- Блок оптичен предавател ONU;
- Свързващи оптични влакна Patch cord;
- PLC сплитери;
- WDM;

Обратният канал на дължина на вълната 1490 nm е формиран от следните блокове:

- Блок оптичен предавател OLT;
- Свързващи оптични влакна Patch cord;
- PLC сплитери;
- WDM;

Трите канала са спектрално мултиплексирани чрез използване на суматори на оптична мощност – WDM. Трите канала се демултиплексират чрез използване на оптични сплитери – WDM.

За максимално доближаване до реалните условия между отделните основни блокове са предвидени връзки чрез оптични конектори – блокове Connector , със зададено затихване в тях от 0,5 dB.

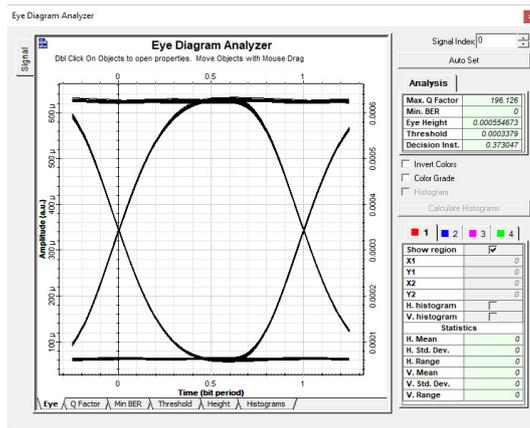
Чрез този симулационен модел може да се изучава поведението на схемата при следните допускания:

- Въведена входна оптична мощност 0dBm за DS и US каналите;
- NRZ кодиране на оптичния сигнал в предавателите;
- Симулация при различни дължини на оптичната линия: от 8 m (ограничена от сумарната дължина на пач-кордите, използвани в практическия модел) до 10 km (типична дължина на PON-мрежи за градски условия, например за доставка на телевизия и интернет);
- Използване на едномодово оптично влакно (SMF) с километрично затихване $\alpha = 0,3$ dB/km.

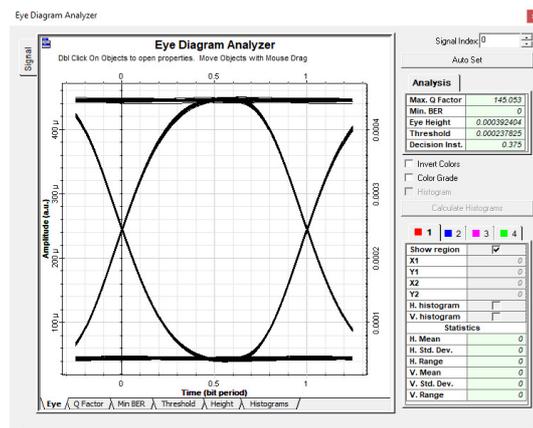
4.4.2. Изследване на симулационния модел на пасивна оптична мрежа

На фиг. 4.18 са показани око-диаграмите за трите оптични канала за случаи на практическата реализация на модела – при дължина на оптичната линия 8 m, а на фиг. 4.19 – око-диаграмите за двата оптични канала за граничния случай – при максимална дължина на оптичната линия 10 km.

На фиг. 4.20 са показани времедиаграмите на оптичния сигнал преди демултиплексирането на двата канала при дължини на оптичната линия респективно за случая на практическия модел (8m) и за максимално допустимия случай (10km).

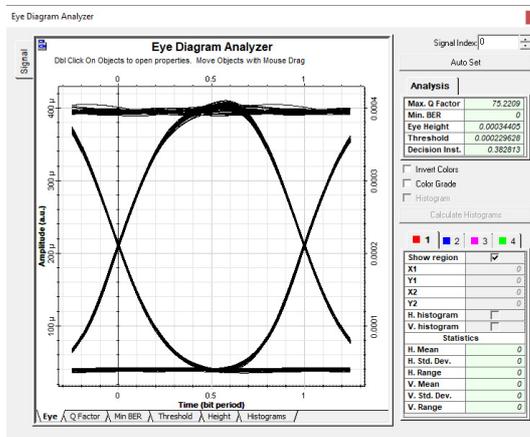


а)

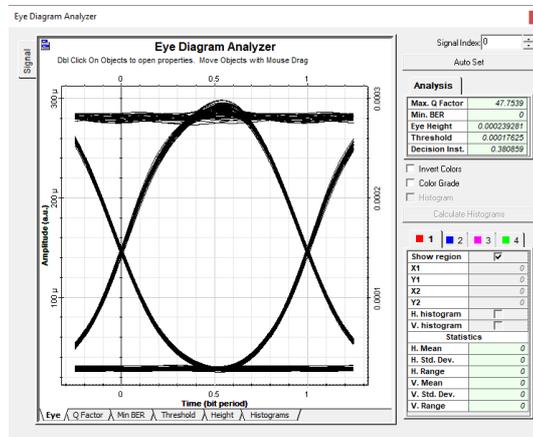


б)

Фиг. 4.18. Око-диаграма и Q-фактор на оптичната линия за дължина λ на оптичната линия: а) DS 1490 nm, б) DS 1550 nm

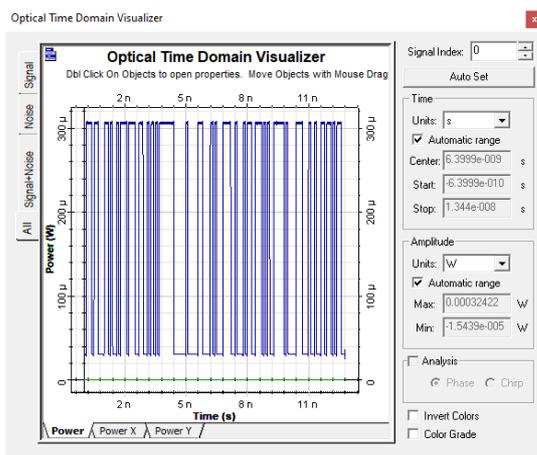


а)

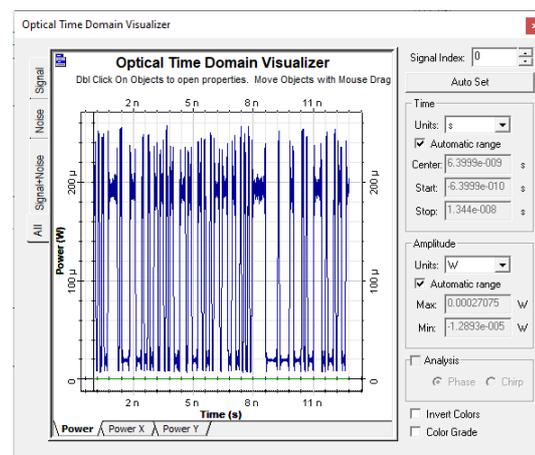


б)

Фиг. 4.19. Око-диаграма и Q-фактор на оптичната линия за дължина λ на оптичната линия: а) DS 1490 nm, б) DS 1550 nm



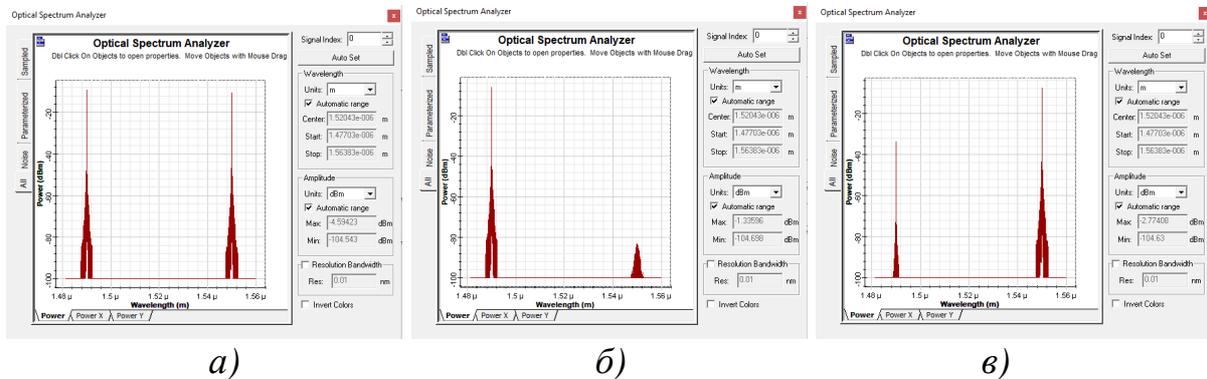
а)



б)

Фиг. 4.20. Времедиаграми на приетия оптичен сигнал преди демултиплексване за дължина на оптичната линия: а) 8 km и б) 10 km

На фиг. 4.21 са показани спектралните характеристики на оптичния сигнал преди демултиплексирането на трите канала при дължини на оптичната линия респективно за случая на практическия модел (8m) и за максимално допустимия случай (10km).



Фиг. 4.21. Спектрални диаграми на приетия оптичен сигнал преди демултиплексиране за дължина на оптичната линия: а) за двете дължини на вълната, б) за 1490 nm и в) за 1550 nm от WDM

4.5. Разработка и експериментално изследване на практически реализиран модел на стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа

4.5.1. Разработка на практически реализиран модел на стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON)



Фиг. 4.23. Общ вид на реализирания стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа

На базата на представената в идейния проект блокова схема на фиг. 4.1 и избраното оборудване в т.4.2, е разработен стенд за изследване на

мультиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON). Общият вид на практическият модел е показан на фиг. 4.23.

4.5.2. Експериментално изследване на практически реализиран модел на стенд за изследване на мультиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON)

Експерименталното изследване на модела е реализирано чрез измерване на нивото по мощност на оптичните сигнали в избрани контролни точки в двете посоки (DS и US). Резултатите от експерименталното изследване са показани в таблици 4.2 до 4.6.

Таблица 4.2. Измерено ниво по мощност на оптичния сигнал в PLC сплитер 1/2

PLC 1/2	1490 nm/dBm	1550 nm
Port 1	-6.10	-6.17
Port 2	-10.32	-10.37

Таблица 4.3. Измерено ниво по мощност на оптичния сигнал в PLC сплитер 1/4

PLC 1/4	1490 nm/dBm	1550 nm/dBm
Port 1	-1.40	-5.56
Port 2	-1.67	-5.67
Port 3	-1.44	-5.48
Port 4	-1.39	-5.05

Таблица 4.4. Измерено ниво по мощност на оптичния сигнал в PLC сплитер 1/8

PLC 1/8	1490 nm/dBm	1550 nm/dBm
Port 1	-16.31	-20.62
Port 2	-16.35	-20.66
Port 3	-16.28	-20.60
Port 4	-16.32	-20.64
Port 5	-16.30	-20.59
Port 6	-16.29	-20.54
Port 7	-16.50	-20.66
Port 8	-16.47	-20.70

Таблица 4.5. Измерено ниво по мощност на оптичния сигнал в PLC сплитер 1/16

PLC 1/16	1490 nm/dBm	1550 nm/dBm
Port	-17.17	-21.34
Port	-17.16	-21.24
Port	-17.05	-21.25
Port	-17.26	-21.45
Port	-17.18	-21.36
Port	-17.25	-21.52

Port	-17.36	-21.45
Port	-17.16	-21.34
Port	-17.12	-21.41
Port	-18.18	-22.50
Port	-17.34	-21.69
Port	-18.60	-22.76
Port	-17.36	-21.42
Port	-17.19	-21.25
Port	-17.32	-21.16
Port	-17.36	-21.50

Таблица 4.6. Измерено ниво по мощност на оптичния сигнал на входа на ONU

ONU	1490 nm	1550 nm	1310 nm
dBm	-4.02	-6.5	+4.03

4.6. Изводи към Глава 4

1. Разработени са симулационен и практически реализиран модел на стенд за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа (PON).
2. Разработеният модел предлага гъвкави опции за теоретично и практическо обучение на студенти, технически персонал, като платформа за провеждане на различни симулационни и практически изследвания в областта на пасивните оптични мрежи и доставката на широколентови услуги.
3. Разработеният практически модел има много предимства като малкия си размер, широкия набор от възможности, гъвкавата модулна структура и лесно може да се използва в състава на по-голяма мрежова структура. Моделът има и недостатък – фиксираните дължини на вълните, които се използват от оптичния предавател (1550nm), ONU (1310nm), и оптичния SFP модул на OLT (1490nm).
4. Има широк набор от възможности за провеждане на теоретични и практически изследвания върху симулационния и практически реализирания модели: използване на различни типове и дължини на оптичните влакна; оптимизация на параметрите на оборудването; изследване на оптични нелинейни ефекти в преносната мрежа; емулиране на сигнали за различни видове услуги и анализ на трафичното натоварване; емулиране на голям брой потребители и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптичните WDM-PON мрежи предоставят значителни възможности за еволюцията на широколентови инфраструктури от следващо поколение, предлагайки мощна основа за висококапацитетни, сигурни и ориентирани към бъдещето комуникационни услуги. Чрез разпределяне на специална

дължина на вълната на всеки потребител или услуга, WDM-PON елиминира ограниченията за споделяне на честотна лента, открити в традиционните TDM-базирани системи, позволявайки симетрична многогигабитова производителност и изключително качество на услугата. Това архитектурно предимство отваря вратата към широк спектър от съвременни приложения, от ултра надеждна корпоративна свързаност до облачни услуги, стрийминг с висока резолюция и индустриална автоматизация в реално време.

Присъщата мащабируемост на WDM-PON предоставя на операторите дългосрочен път на растеж: нови потребители или услуги могат да бъдат настанени просто чрез добавяне на нови дължини на вълните, без да се променя съществуващата оптична инфраструктура. Това прави WDM-PON изключително привлекателен за поддръжка на гъсто разположени градски инсталации, както и за разширяване в селските райони. Изоляцията на дължината на вълната също така подобрява мрежовата сигурност, което го прави идеален за правителството, отбраната, финансовите институции и критично важни сектори, където защитата на данните е от съществено значение.

WDM-PON е уникално позициониран да играе централна роля в нововъзникващите технологии като 5G/6G мобилен фронтхаул, платформи за интелигентни градове и разпределени периферни изчисления. Комбинацията от дълъг обхват, ниска латентност и висок капацитет е в перфектно съответствие със строгите изисквания на съвременните безжични мрежи и интелигентни системи. Тъй като глобалният трафик на данни продължава да расте, WDM-PON се откроява като надеждно и гъвкаво решение, което може да отговори на нарастващите изисквания за производителност, като същевременно намалява оперативните разходи чрез своя пасивен, енергийно ефективен дизайн.

Като цяло, WDM-PON представлява трансформативна възможност за мрежовите оператори и доставчиците на услуги, предлагайки технологичните възможности, необходими за изграждане на устойчиви, високопроизводителни оптични мрежи за достъп, способни да поддържат дигиталното бъдеще.

Основният момент при постигането на качеството на услугата в оптичните пасивни мрежи със спектрално мултиплексиране, е свързан с линейното кодиране и модулация в оптични канали за пренос от гледна точка на осигуряването на максимална дистанция на предаване, висок Q-фактор, респективно BER, добри спектрални характеристики и енергиен бюджет на системата, отчитайки основните ограничаващи фактори, преходните характеристики и ограниченията от дисперсията и затихването по влакното, нелинейните ефекти и броя оптични участъци.

Чрез използването на предимствата на добрите характеристики и надеждността на оптичните предаватели и приемници, ниските загуби и

широката честотна лента на оптичните влакна, може да се реализират голямо разнообразие от многоканални оптични системи с различни типове линейно кодиране и модулация в оптичните преносни линии. Голямо приложение намират Мах-Зендер структурите на изграждане на модулаторите.

Създаването на симулационни модели и текущите изследвания на WDM-PON оптичните мрежи са от съществено значение за повишаване на ефективността, надеждността и мащабируемостта на съвременните широколентови инфраструктури. WDM-PON е сложна технология, която интегрира управление на дължината на вълната, оптично разпространение, пасивни компоненти и специфична за потребителя изолация на каналите. Тъй като тези системи включват множество променливи – като разпределение на дължината на вълната, контрол на мощността, ефекти на дисперсия и топология на мрежата – симулационните модели осигуряват безопасна, рентабилна и изключително гъвкава среда за анализ на поведението на системата преди внедряването в реалния свят. Чрез симулация изследователите могат да прогнозират производителността, да идентифицират потенциални пречки и да оптимизират системните параметри без финансовите и логистични ограничения на физическото тестване.

Симулационните инструменти позволяват експериментиране с нови архитектури, алгоритми и технологии, като динамично разпределение на дължината на вълната, усъвършенствани формати на модулация и AWG-базирани стратегии за маршрутизиране. Това ускорява иновациите и подкрепя разработването на WDM-PON проекти от следващо поколение, способни да отговорят на бързо нарастващите изисквания за честотна лента. Изследванията също така помагат за оценка на въздействието на нововъзникващите приложения – като 5G/6G fronthaul, IoT екосистеми, облачни услуги и периферни изчисления – като гарантират, че WDM-PON мрежите могат да се развият, за да поддържат бъдещите комуникационни изисквания.

Изследванията, основани на симулации, играят ключова роля за повишаване на мрежовата сигурност и устойчивост. Чрез моделиране на различни сценарии на повреди, източници на смущения и киберзаплахи, инженерите могат да разработят стратегии за укрепване на устойчивостта на WDM-PON инфраструктурите. Това е особено важно за приложения, които изискват висока надеждност, като например индустриална автоматизация, здравни системи и правителствени мрежи.

Като цяло, създаването на точни симулационни модели и непрекъснатите изследвания в WDM-PON системите са от решаващо значение за разбирането на поведението на системата, намаляването на рисковете при внедряване, насърчаването на иновациите и гарантирането, че WDM-PON технологията остава водещо решение за високопроизво-

дителни оптични мрежи за достъп. Тези усилия не само подобряват настоящите мрежови дизайни, но и проправят пътя към по-интелигентни, адаптивни и готови за бъдещето оптични комуникационни системи.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. Предложена е методология и алгоритъм за оптимално планиране, измерване, моделиране и изследване на пасивни оптични мрежи със спектрално мултиплексиране на сигналите.
2. Синтезирани са имитационни модели за изследване, анализ, оценка на производителността и решаване на оптимизационни задачи във високоскоростни (10Gbps) многоканални оптични мрежи при използвани на различни формати за оптична модулация (NRZ и RZ) на сигналите и различни комплексни конфигурационни параметри.
3. Изследвана е степента на влияние на високата оптична плътност в сърцевината на влакното за появата на нелинейни ефекти (FWM, SPM и XPM) при различни формати на оптична модулация на сигналите (RZ и NRZ). Установено е RZ импулсите имат по-голям пикова мощност и като такива са по-податливи на FWM, SPM и XPM. Но в присъствието на SPM тези импулси могат да претърпят компресия (солитони) и да бъдат по-ефективни от NRZ импулсите.
4. Изведени са зависимости свързани с определяне на граничните условия и максималната стойност на Q-фактора при различни входни параметри и обхват на мрежата, с определяне на загубите при радиоразпространение, око-диаграмите на каналните оптични сигнали и оптималната стойност на входната оптична мощност.

Приложни приноси:

5. Разработени и изследвани са симулационни модели на многоканални високоскоростни оптични комуникационни мрежи за решаване на оптимизационни задачи по критерии постигане на минимална стойност на BER (Мин. BER) или максимален Q фактор и осигуряване на максимална производителност и ефективност на мрежата при различни входни параметри на сигналите.
6. Разработен и изследван е практически модел / опитна постановка на пасивна оптична мрежа (PON) със спектрално мултиплексиране на сигналите за доставка на интерактивни услуги, предназначена за изпълнение на три основни задачи: да позволи голямо разнообразие от практически изследвания (обработка на трафика, въвеждане на нови услуги и модули за управление и комуникация, и др.); да бъде платформа за провеждане на общи изследвания в областта на пасивните оптични мрежи; да осигури удобно и лесно обучение на персонал.

7. Дефинирани са стъпки на експериментално изследване и са представени експериментални резултати за комплексно определяне и оценка на енергийния баланс и параметрите на модела за изследване на мултиплексирани оптични сигнали в пасивна оптична мрежа, чрез използване на специализирано измервателно оборудване.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A.1] Ангелакис, М., **Кипреос, Е.**, Ангелов, К., Учебна демонстрационна платформа за IP-видеопоточно предаване и мониторинг на телевизионно съдържание, Сборник доклади: VIII Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2024”, 28 юни 2024, гр. Ловеч, ISSN - 3033-1323, стр.112-116. (Конференция в НАЦИД)
- [A.2] Попов, В., **Кипреос, Е.**, Ангелакис, М., Внедряване на 3D обекти при видеообработка, чрез Blender, Студентската научна сесия`2024, 18.10.2024, гр. Габрово, ISSN: 1313-3055, Том 1, стр. 84-89. (Конференция в НАЦИД)
- [A.3] Тодоров, Н., **Кипреос, Е.**, Ангелакис, М., Мониторинг на нивото на течност при бутилиране, чрез обработка и анализ на изображения, Студентската научна сесия`2024, 18.10.2024, гр. Габрово, ISSN: 1313-3055, Том 1, стр. 90-95. (Конференция в НАЦИД)
- [A.4] **Кипреос, Е.**, Садинов, С., Ангелакис, М., Ангелов, К., Изследване на ефективността от прилагане на WDM-DCF компенсация във влакнесто-оптични комуникационни системи. Сборник доклади: IX Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2025”, 27 юни 2025, гр. Ловеч, ISSN: 3033-1323, стр.151-156. (Конференция в НАЦИД)
- [A.5] **Кипреос, Е.**, Обследване и анализ на въздействието на електромагнитни полета и радиочестотни излъчвания в градска среда. Сборник доклади: IX Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2025”, 27 юни 2025, гр. Ловеч, ISSN: 3033-1323, стр. 246-251. (Конференция в НАЦИД)
- [A.6] **Кипреос, Е.**, Моделиране, изследване и анализ на подходи за минимизиране на изкривяванията в оптични WDM системи. Сборник доклади: Международна научна конференция „Унитех 2025“, 20-22 ноември 2025, гр. Габрово, ISSN: 1313-230X. (Конференция в НАЦИД)

**TITLE: “METHODS AND ALGORITHMS FOR RESEARCH ON
MULTIPLEXED SIGNALS IN PASSIVE OPTICAL COMMUNICATION
NETWORKS”**

Author: Emmanouil Themistoklis Kypraios

ABSTRACT

In Chapter 1, an analysis of the current state and areas of research and development in passive optical communication networks with spectral multiplexing is made. The main problems in this type of networks are analyzed and summarized. As a result, the main goal and tasks of the dissertation are formulated and motivated.

In Chapter 2, a generalized approach to modeling a multi-channel optical communication network is presented, a basic model is developed and a methodology for conducting measurements and testing of WDM PON systems is compiled.

In Chapter 3, simulation studies are performed and analyses of the results for a simulation model of a multi-channel WDM system with different formats of optical external modulation of signals and configuration of optical sections are presented. An algorithm for optimal planning and optimization of the parameters of a multi-channel optical communication line is synthesized.

In Chapter 4, a conceptual design, modeling, practical implementation and research of an experimental stand for studying multiplexed optical signals in a passive optical network are presented. The architecture of the stand is presented, the key control points for conducting research are presented, discussed and analyzed, and experimental results from conducting measurements are presented.

Keywords: passive optical network, wavelength division multiplexing, optical signal, optical modulation, optical spectrum, eye diagram, power budget