

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)  
в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор УрТИСИ СибГУТИ  
/ Е.А. Минина  
\_\_\_\_\_  
(подпись) (Ф.И.О)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**на тему:** Исследование вопросов организации резервирования оптических  
каналов в системах WDM

Направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи  
(профиль Многоканальные телекоммуникационные системы)  
(код и наименование направления, профиля)

Программа подготовки академическая магистратура  
(наименование программы)

Магистр гр. МИТЕ-81 \_\_\_\_\_ / Д.П. Шестакова  
(подпись) (Ф.И.О)

Научный руководитель работы \_\_\_\_\_ / И.И. Салифов  
К.Т.Н. (подпись) (Ф.И.О)  
уч. степ. уч. звание

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ / Е.В. Букрина  
(подпись) (Ф.И.О)

Работа рассмотрена кафедрой МЭС  
и допущена к защите в ГЭК  
Заведующий кафедрой Е.А. Субботин  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г (подпись)

Екатеринбург  
2020

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)  
в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

Кафедра \_\_\_\_\_ Многоканальной электрической связи  
(наименование кафедры)

Направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи  
(профиль Многоканальные телекоммуникационные системы)  
(код и наименование направления, профиль)

Программа \_\_\_\_\_ академической магистратуры  
(код и наименование программы)

Утверждаю  
Зав. кафедрой МЭС  
Е.А. Субботин

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### **ЗАДАНИЕ на магистерскую диссертацию**

Студенту магистратуры \_\_\_\_\_ Шестаковой Дарье Павловне

1 Тема диссертации: «Исследование вопросов организации резервирования оптических каналов в системах WDM» утверждена приказом по университету № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

2 Цель работы: разработки новых схем резервирования оптических каналов на сетях DWDM.

3 Основные требования и исходные данные: Технические характеристики сетей WDM, руководящие документы отрасли РД 45.195-2001, рекомендации ITU-T серии G.680, G.695, G.698.1, G.698.2, G.808.1, G.873.1, G.873.3, список литературы.

4 Научная и практическая ценность ожидаемых результатов: Научная новизна работы заключается в разработке новых схем резервирования оптических каналов WDM систем. Практической значимостью работы являются разработанные схемы резервирования оптических каналов в программе OptiSystem, которые могут применены в постановке лабораторно-практических работах по дисциплинам кафедры МЭС в соответствии с ФГОС 3++ направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; в оценке качественных показателей новых разработанных схем резервирования каналов WDM путем математического моделирования. А разработанные новые схемы резервирования каналов WDM могут применены на практике путем интеграции простейших оптических компонентов в существующее оборудование WDM.

5 Способ реализации результатов работы: Возможность адаптации и использования материала, представленного в магистерской диссертации, для проектирования оптических сетей WDM, в лекционном курсе в постановке лабораторно-практических работ учебных курсов «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Транспортные сети связи» – профиля «Транспортные сети и системы связи»; учебных курсов «Оптические цифровые телекоммуникационные системы», «Синхронные транспортные сети», «Транспортные сети и системы с волновым мультиплексированием» – профиля «Технологии и системы оптической связи».

6 Перечень основных вопросов, которые должны быть рассмотрены в диссертации:

6.1 Технология WDM и ее компоненты;

6.2 Анализ действующих схем резервирования на сетях WDM и поиск проблем в действующих схемах резервирования;

6.3 Разработка новых схем резервирования на сетях WDM;

6.4 Оценка применимости новых схем резервирования на практике.

7 Перечень графического и иллюстративного материала:

1) Резервирования канала на оптическом уровне по схеме 1:1 и 1+1;

2) Типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом;

3) Схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с резервированием транспондеров на основе пассивных компонентов;

4) Схема резервирования оптических каналов WDM в линейной топологии, на уровне транспондеров;

5) Блок-схема участка сети WDM;

6) Блок-схема мультиплексора MUX A, MUX C, MUX B;

7) Результаты моделирования: спектральные значения каналов WDM;

8) Результаты моделирования: глаз-диаграммы и коэффициент ошибок;

9) Маршруты прохождения основного и резервного канала WDM;

Научный руководитель работы

К.Т.Н  
уч. степень      ученое звание

/И.И. Салифов  
(подпись)      (ФИО)

Консультанты по работе

          
уч. степень      ученое звание

/  
(подпись)      (Ф.И.О)

Дата выдачи задания

«30» ноября 2018 г.

Задание принял к исполнению  
Магистрант гр. МИТЕ-81

/ Д.П. Шестакова  
(подпись)      (Ф.И.О)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)  
в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

**ОТЗЫВ**  
**научного руководителя на магистерскую диссертацию**

Магистранта Шестаковой Дарьи Павловны  
Группы МИТЕ 81  
Тема диссертации Исследование вопросов организации резервирования  
оптических каналов в системах WDM  
Направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии  
и системы связи  
Программа подготовки Академическая магистратура  
Профиль Многоканальные телекоммуникационные системы

Заключение о степени соответствия диссертации заданию

*Содержание пояснительной записки соответствует выданному  
техническому заданию.*

Актуальность темы

*Тема магистерской диссертации посвящена актуальной теме в области исследования вопросов организации резервирования оптических каналов WDM. Так, в резервировании каналов систем DWDM наблюдаются две существенные проблемы. Первая проблема заключается в том, что выделенный частотный диапазон, а это порядка 96 каналов, отводится не только для организации рабочих каналов, но и на организацию резервных каналов, то есть из 96 каналов для передачи данных задействуется 46 каналов. Вторая проблема заключается в том, что для переключения на резервный канал применяется оборудование высокой стоимости – оптические кросс-коммутаторы и активные мультиплексоры ввода-вывода. В работе предложены новые схемы резервирования, которые решают эту проблему путем интеграции дешевых компонентов (поляризационный сплиттер, оптический разветвитель или объединитель) в мультиплексорное оборудование DWDM. При этом, интеграция возможна как на действующих, так и на проектируемых сетях DWDM.*

## Научные результаты, полученные автором

- 1) Разработаны новые схемы резервирования оптических каналов WDM с применением пассивных компонентов, которые можно интегрировать как в существующее, так и в проектируемое оборудование DWDM.
- 2) В САПР OptiSystem смоделированы разработанные новые схемы резервирования каналов WDM.
- 3) Полученные результаты моделирования, в виде глаз-диаграмм и коэффициента ошибок, показали положительный результат

## Новизна и достоверность результатов

Научная новизна заключается в разработке новых схем резервирования каналов WDM, которые решают две не маловажные проблемы - высокая стоимость оборудования и неэффективное использование выделенного частотного диапазона.

Достоверность полученных результатов обусловлено использование системы автоматизированного проектирования OptiSystem, которая ориентирована на решение сложные задачи по разработке, моделированию, тестированию и оптимизации различных видов оптических линий связи.

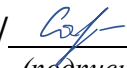
## Заключение:

Магистерская диссертация Шестаковой Дарьи Павловны  
(Ф.И.О. магистранта)

**соответствует** (не соответствует) требованиям ФГОС ВО к профессиональной подготовке магистра по данному направлению и **может** (не может) быть допущена к защите. Считаю, что данная магистерская диссертация заслуживает оценки отлично, а её автор присуждения квалификации магистра по направлению 11.04.02

Инфокоммуникационные технологии и системы связи

(наименование направления)

Научный руководитель к.т.н /  / Салифов И.И.  
ученая степень, ученое звание (подпись) (Ф.И.О)

«15» июня 2020 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)  
в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

**РЕЦЕНЗИЯ**  
**на магистерскую диссертацию**

Магистранта Шестаковой Дарьи Павловны

Группы МИТЕ-81

Тема диссертации Исследование вопросов организации резервирования  
оптических каналов в системах WDM

Направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии  
и системы связи

Программа подготовки академическая магистратура

Профиль Многоканальные телекоммуникационные системы

Актуальность темы

Существующие варианты резервирования оптических каналов WDM, имеют недостатки, к которым можно отнести высокую стоимость оборудования, а также неэффективное использование частотного диапазона систем WDM, в частности, систем плотного волнового спектрального мультиплексирования DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Такое неэффективное использование частотного диапазона обусловлено тем, что часть оптических каналов используются в качестве резервных каналов, поэтому общая пропускная способность системы DWDM уменьшается в два раза.

Конкретные решения этих недостатков, как показано в результате проведенного автором подробного обзора литературных данных, практически отсутствуют. Это обстоятельство показывает степень актуальности темы диссертации, посвященной решению приведенных вопросов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в разработке новых схем резервирования оптических каналов WDM систем.

### Значимость результатов для науки и практики

Разработаны новые схемы резервирования оптических каналов WDM систем. В качестве практических результатов работы отмечаются разработанные схемы резервирования оптических каналов с использованием программы OptiSystem, которые могут применены в постановке лабораторно-практических работах по дисциплинам кафедры МЭС в соответствии с ФГОС 3++ направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Сюда можно отнести и проведенную автором оценки качественных показателей новых разработанных схем резервирования каналов WDM путем математического моделирования. Кроме того, разработанные новые схемы резервирования каналов WDM могут быть применены на практике путем интеграции простейших оптических компонентов в существующее оборудование WDM.

### Степень соответствия подготовки выпускника требованиям ФГОС ВО

Подготовка выпускника соответствует требованиям ФГОС ВО по направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

### Замечание по диссертации

- 1) Если рассматривать системы, использующие технологию WDM, как комплексные системы с резервированием, то как к такой системе применимо понятие надежности согласно стандартного определения надежности и в чем заключается надежность такой системы с рассматриваемым резервированием?
- 2) Как оценивается надежность такой системы?


### **Заключение:**

Магистерская диссертация Шестаковой Дарьи Павловны  
(Ф.И.О. магистранта)

**соответствует** (не соответствует) требованиям ФГОС ВО к профессиональной подготовке магистра по данному направлению и **может** (не может) быть допущена к защите. Считаю, что данная магистерская диссертация заслуживает оценки **ОТЛИЧНО**, а её автор присуждения квалификации магистра по направлению \_\_\_\_\_

11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

\_\_\_\_\_  
(наименование направления)

Рецензент к.ф.-м.н., доцент /  / Куанышев В.Т.  
ученая степень, ученое звание (подпись) (Ф.И.О)

« 15 » июня 2020г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Анализ научных публикаций и исследований в области резервирования каналов WDM	10
1.1 Технология WDM	10
1.2 Резервирования на сетях WDM	27
1.3 Выводы	40
2 Разработка новых вариантов схем резервирования каналов WDM	42
2.1 Разработка схем резервирования каналов WDM	42
2.2 Выводы	49
3 Моделирование новых схем резервирования каналов WDM	50
3.1 Постановка задачи	50
3.2 Выбор программного обеспечения для моделирования	51
3.3 Разработка блок-схем резервирования оптических каналов WDM	56
3.4 Выводы	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	87
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	92
ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ	94



## ВВЕДЕНИЕ

Современный мир инфокоммуникаций базируется на транспортных технологиях сетях связи, таких как сети волнового спектрального мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Сети WDM позволяют организовать передачу как интерактивных, так и мультимедийных сервисов с поддержкой сетевых протоколов передачи (Ethernet, IP, MPLS). Передача эти сервисом может выполняться как на городских транспортных сетях, так и на магистральных сетях связи протяженностью единицы тысяч километров.

К транспортным сетям WDM предъявляются достаточно высокие требования по надежности сети и по транспортировке сервисов с высоким качеством. Под качеством передаваемых сервисных сигналов понимают минимальный коэффициент ошибок на приёмной стороне сети WDM, который обеспечивается благодаря применению современных типов модуляции оптической несущей сети WDM и применению современных алгоритмов обнаружения и исправления ошибок в оптическом канале WDM,

Модуляция оптической несущей и алгоритмы обнаружения и исправления ошибок в оптическом канале, в отличие от надежности сети WDM, достаточно широко рассматривается как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Под надежность сети WDM понимают резервирование оптических каналов и маршрутов, резервирование оборудования и направляющей среды. Резервирование на сетях WDM, с экономической и практической точки зрения относится к сложной задаче, что сказывается на конечной стоимости оборудования.

В зависимости от поставленных задач в проектируемых сетях WDM, могут реализовываться различные варианты резервирования. В некоторых случаях, резервирования не требуется, в некоторых, требуется частичная реализация, а на крупных магистральных сетях, где передаются данные как обычных пользователей, так и данные спецслужб Российской Федерации, сети WDM

строятся со стопроцентным резервированием.

Организация резервирования на сетях WDM описывается в литературе авторами Листвин В.Н., Трещиков В.Н., Фокин В.Г., Скляр О. К., Цуканов В.Н., Довольнов Е.А. Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н., Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М., Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Mohamed Salah Tabour, Ahmed El-Sherbeny, Каминецкий И.С.; в рекомендациях ITU-T G.680, G.695, G.698.1, G.698.2, G.808.1, G.873.1, G.873.3, а также в руководящих документах отрасли РД 45.195-2001.

В данных источниках представлены теоретические аспекты организации резервирования оптических каналов и маршрутов, резервирования оборудования и направляющей среды, которые выражены в виде схем резервирования, реализуемых на практике.

Проводя анализ теоретических аспектов, можно говорить о том, что представленные варианты резервирования, в частности, оптических каналов WDM, имеют недостатки, такие как высокая стоимость оборудования и неэффективное использование частотного диапазона систем WDM, в частности систем плотного волнового спектрального мультиплексирования DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Неэффективное использование частотного диапазона обусловлено тем, что часть оптических каналов используются в качестве резервных каналов, и общая пропускная способность системы DWDM уменьшается в два раза.

Решение этих двух недостатков в рассмотренной литературе, в научно-исследовательских работах, как в зарубежных, так и в отечественных – не рассматривается, что говорит об актуальности обозначенных недостатков в рамках магистерской диссертации на тему «Исследование вопросов организации резервирования оптических каналов в системах WDM». Кроме этого, рассмотрение данных вопросов имеет взаимосвязь с Программой «Цифровая экономика Российской Федерации» (распоряжение правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р) в рамках дорожной карты пункта 5.2, где говорится о «надежности

функционирования российского сегмента сети «Интернет», а также, про «план перевода маршрутизации трафика российского сегмента сети «Интернет» на территорию России». Все это базируется на резервировании оптических каналов транспортной сети DWDM, которая является фундаментальной основой сети Интернет.

В качестве объекта исследования выбрана транспортная сеть связи технологии WDM, в частности DWDM. Предметом исследования является оптический канал WDM, как основной, так и резервный.

Целью магистерской диссертации является разработки новых схем резервирования оптических каналов на сетях DWDM.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение технологии WDM и ее компонентов;
- обзор и анализ существующих схем резервирования оптических каналов и маршрутов в системах WDM и поиск проблем в действующих схемах резервирования;
- разработка схем резервирования оптических каналов;
- моделирование разработанных схем резервирования в графической среде OptiSystem;
- анализ результатов моделирования и оценка возможности применимости разработанных схем резервирования на практике.

Решение поставленных задач осуществлялось с использованием методов системного анализа, проектирования и моделирования.

Научная новизна работы заключается в разработке новых схем резервирования оптических каналов WDM систем.

Практической значимостью работы являются разработанные схемы резервирования оптических каналов в программе OptiSystem, которые могут применены в постановке лабораторно-практических работах по дисциплинам кафедры МЭС в соответствии с ФГОС 3++ направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; в оценке качественных показателей новых разработанных схем резервирования каналов WDM путем

математического моделирования. Разработанные новые схемы резервирования каналов WDM могут применены на практике путем интеграции простейших оптических компонентов в существующее оборудование WDM.

# 1 Анализ научных публикаций и исследований в области резервирования каналов WDM

## 1.1 Технология WDM

### 1.1.1 Основы волнового спектрального мультиплексирования.

Технология волнового спектрального мультиплексирования WDM (Wavelength Division Multiplexing) заключается в организации различных сервисов (TDM, ATM, IP, Ethernet), передаваемых на различных оптических каналах (длин волн) в оптоволокне. Типовая схема, поясняющая технологию WDM представлена на рисунке 1.1 [1].

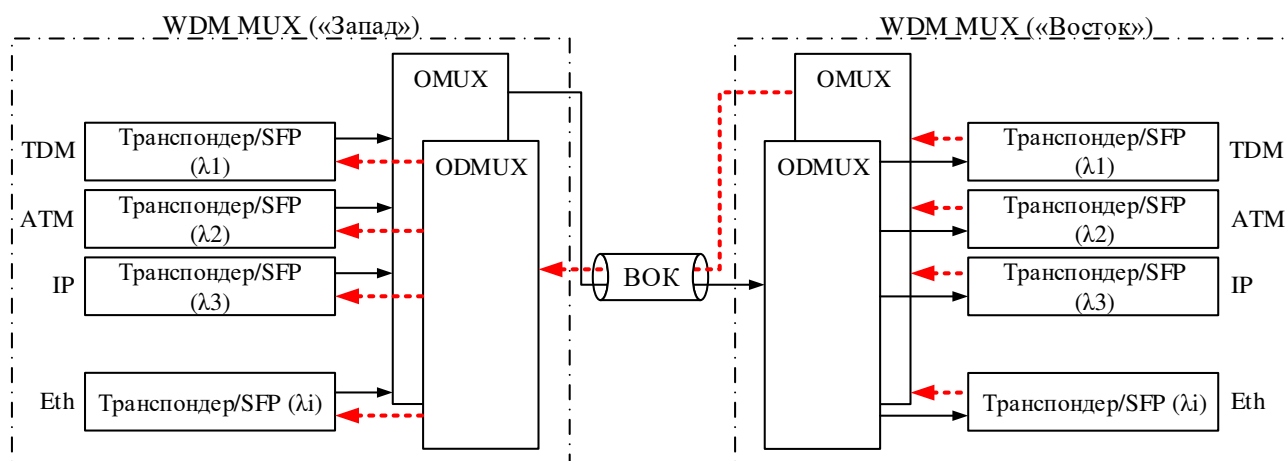


Рисунок 1.1 – Типовая схема организации сети WDM

Технология WDM как правило применяется на магистральных (транспортных) сетях связи. Для организации линейного тракта на оптических сетях WDM применяют дуплексный двухволоконный вариант построения сети: одно волокно, предназначено для передачи оптических цифровых каналов в направлении «Запад – Восток» (тонкая сплошная линия); второе волокно – в направлении «Восток – Запад» (пунктирная линия).

Организуемые оптические каналы WDM могут мультиплексироваться с

различным шагом ( $\Delta\lambda$ ). В зависимости от шага мультиплексирования выделяют три технологии WDM:

- 1) технология грубого спектрального мультиплексирования CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing);
- 2) технология плотного спектрального мультиплексирования DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing);
- 3) технология высокоплотного спектрального мультиплексирования HDWDM (High-Density Wavelength Division Multiplexer);

В технологии CWDM шаг мультиплексирования составляет 20 нм (2500 ГГц), в технологии DWDM – 0,8 нм (100 ГГц) и 0,4 нм (50 ГГц), в технологии HDWDM – 0,2 нм (25 ГГц) и 0,1 нм (12,5 ГГц). Сети DWDM и HDWDM работают в третьем окне прозрачности оптоволокна, сеть CWDM работает как во втором, так и в третьем окне прозрачности оптоволокна. На рисунке 1.2 представлен типовой спектральный план системы CWDM и DWDM [1].

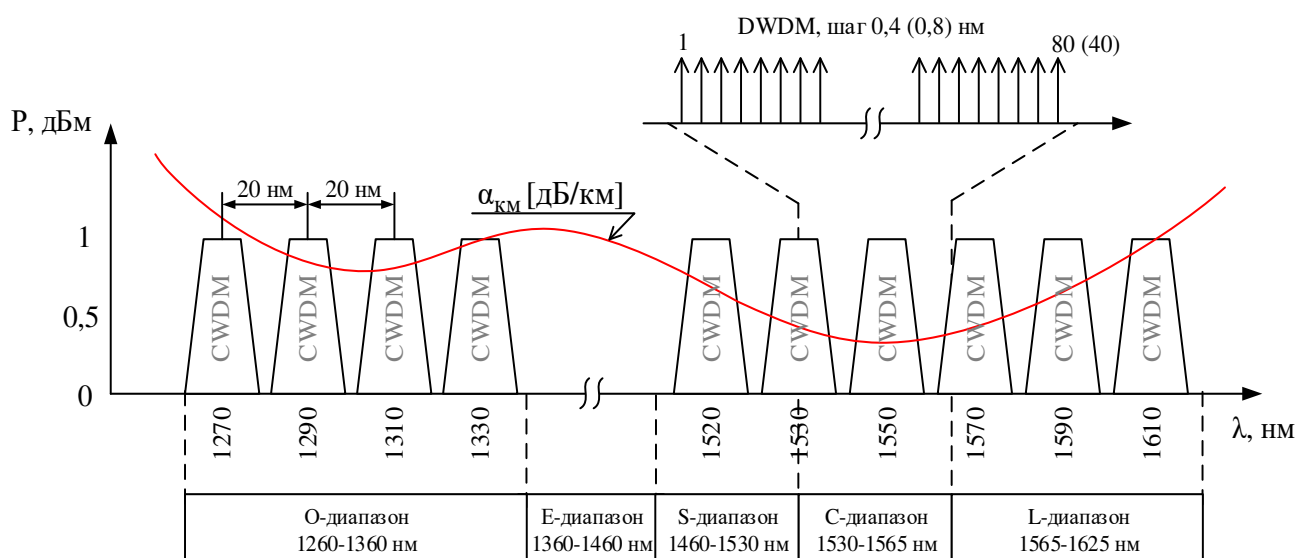


Рисунок 1.2 – Типовой спектральный план

Количество мультиплексируемых каналов в системе CWDM составляет 18, в системе DWDM – 80, в системе HDWDM – 160. При этом, скорость передачи данных в одном оптическом канале CWDM составляет не более 10 Гбит/с, в

системе DWDM и HDWDM, на сегодняшний момент, может достигать до 400 Гбит/с. Суммарная пропускная способность системы CWDM составляет 180 Гбит/с, в системе DWDM – от 8 до 32 Тбит/с, в системе HDWDM более 32 Тбит/с [2].

Как показывает практика, технология CWDM нашла применение на внутризональных и городских транспортных сетях, технология DWDM – на магистральных сетях связи.

### 1.1.2 Компоненты системы WDM.

1.1.2.1 Оптический мультиплексор. В качестве основного оборудования WDM применяется оптический пассивный мультиплексор, который выполняет функцию мультиплексирования (демультиплексирования) оптических каналов с шагом 0,4 нм или 0,8 нм или 20 нм, в зависимости от разновидности технологии WDM.

Оптические мультиплексоры (OMUX) изготавливаются по двум основным технологиям:

- 1) технология TFF (Thin Film Filter);
- 2) технология AWG (Arrayed Waveguide Grating).

Технология TFF дословно переводится как тонкопленочный фильтр. Оптический мультиплексор на основе TFF-фильтра представляет собой простейшую конструкцию, которая имеет один оптический входной (выходной) порт и два выходных (входных) оптических порта. Между оптическими портами в стеклянной капсуле заключен тонкопленочный фильтр, принцип работы которого основан на явлении интерференция. TFF-фильтр, либо пропускает нужную оптическую длину волны в прямом направлении, либо отражает ее в обратном направлении. Конструкция оптического мультиплексора TFF и принцип его действия представлены на рисунке 1.3 [3].

Оптический мультиплексор, который мультиплексирует и демультиплексирует более двух оптических каналов, представляет собой каскадную сборку TFF-фильтров. Пример схемы TFF-мультиплексора на восемь каналов представлен на рисунке 1.4.

Вторая технология, которая применяется для изготовления WDM мультиплексоров – технология на основе массива волноводов (AWG).

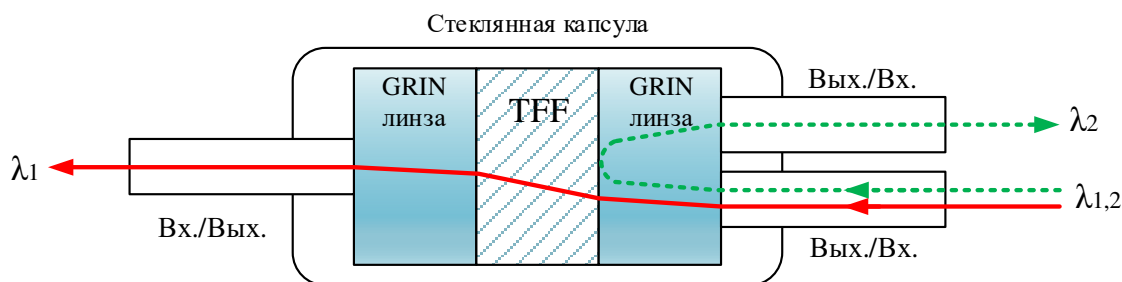


Рисунок 1.3 – Конструктивное исполнения и принцип действия TFF мультиплексора

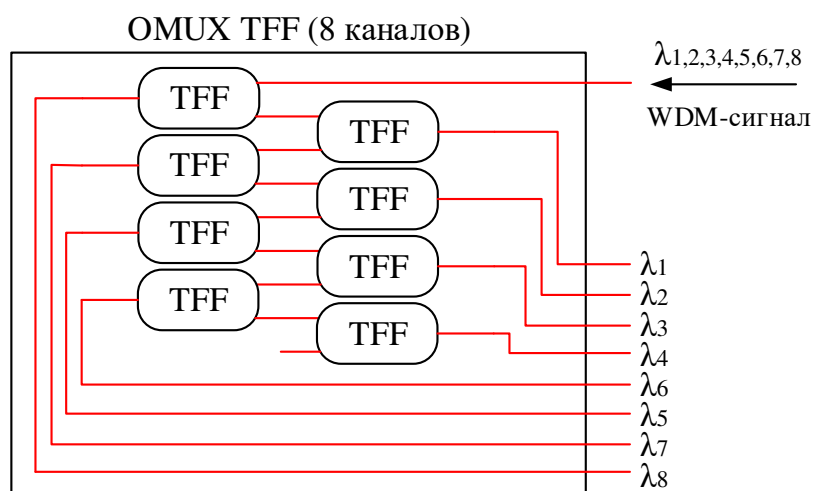


Рисунок 1.4 – Схема TFF-мультиплексора на восемь каналов

В мультиплексоре AWG принцип мультиплексирования и демультиплексирования также основан на явлении интерференция. Структурная схема AWG-мультиплексора представлена на рисунке 1.5.

Отличительной особенностью TFF-мультиплексора от AWG-мультиплексора является то, что количество мультиплексируемых каналов не превышает 20, обусловлено это каскадированием TFF-фильтров.



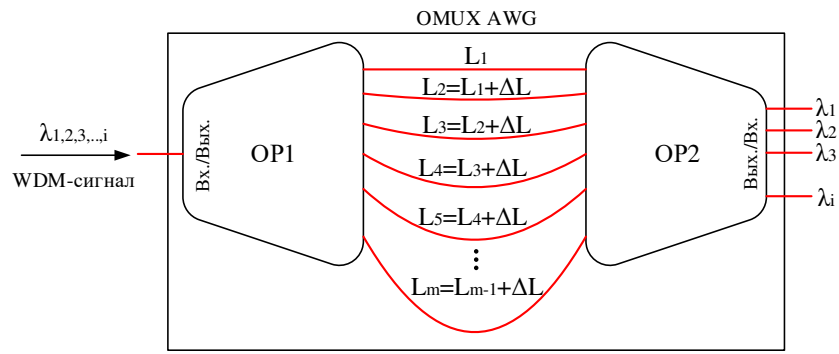


Рисунок 1.5 – Структурная схема AWG-мультиплексора

Дело в том, что оптический маршрут для первого и последнего канала отличается. Для последнего канала длина оптического пути будет больше, а, следовательно, больше оптических потерь. Тем самым, на выходе магистрального порта будет наблюдаться неравномерная амплитудно-волновая характеристика (ABX) группового WDM-сигнала, что в конечном итоге может привести к потере оптических каналов в линейном тракте системы WDM. В AWG-мультиплексоре потери для всех каналов примерно одинаковы, однако имеется относительный разброс по потерям между каналами, который не превышает 1 дБ, а в TFF-мультиплексоре более 1 дБ. На рисунке 1.6 представлена типовая ABX группового сигнала на выходе магистрального порта оптического мультиплексора AWG и TFF [3].

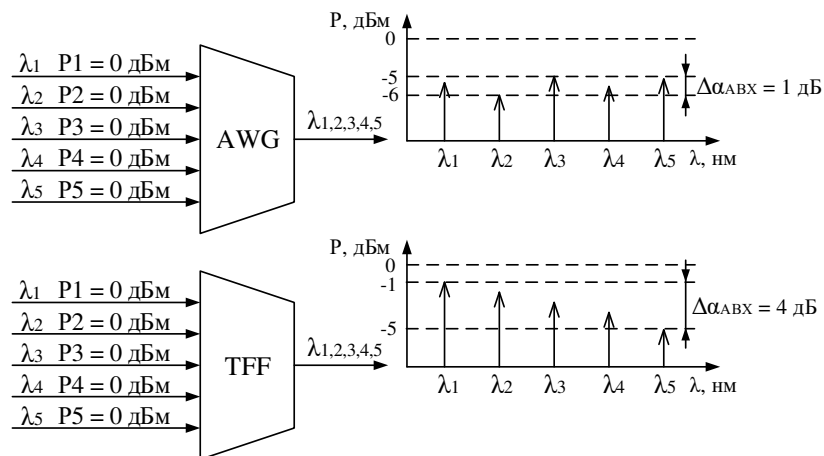


Рисунок 1.6 – Типовая ABX группового WDM-сигнала

Как правило, TFF-мультиплексоры применяются на сетях CWDM, а AWG-мультиплексор на сетях DWDM. Однако, при организации шестнадцати канальной сети могут применяться TFF-мультиплексоры с амплитудно-волновыми выравнителями (эквалайзерами).

Применение AWG- и TFF-мультиплексоров позволяет организовать сети WDM топологии «точка-точка», а сами мультиплексоры получили название оптический терминальный мультиплексор (OMUX TM). Если требуется организовать ввод-вывод оптического канала в промежуточном пункте, применяют оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM).

Мультиплексоры OADM делятся на два типа:

- 1) не перестраиваемый мультиплексор OADM с или без оптоэлектрооптического (ОЭО) преобразования;
- 2) перестраиваемый (активный) мультиплексор OADM (ROADM);

Основным недостатком AWG- и TFF-мультиплексоров является то, что оптические каналы данных (длины волн) физически привязаны к номеру оптического порта мультиплексора. То есть, если требуется переключить канал данных, работающего на длине волны, например, 1540,56 нм, на оптический порт, предназначенный для мультиплексирования канала данных на длине волны 1541,35 нм, то канал данных на длине волны 1540,56 нм мультиплексироваться не будет. Обуславливается это тем, что мультиплексоры работают на основе явления интерференции, на основе которого рассчитываются параметры мультиплексора для фиксированного числа оптических портов заданного частотного плана.

Таким образом, мультиплексор OADM позволяет организовать статический ввод-вывод нужного оптического канала. В перестраиваемом мультиплексоре ROADM, в промежуточном пункте можно выделить и ввести любой оптический канал DWDM, согласно разработанного частотного плана. При этом, выбор канала осуществляется оператором удаленно. Количество вводимых-выводимых оптических каналов в данных мультиплексорах, как показывает практика, не превышает десяти.

Конструктивное исполнение мультиплексоров OADM достаточно простое,

и изготавливаются по том уже принципу, что и терминальные мультиплексоры OMUX WDM. Пример мультиплексора OADM представлен на рисунке 1.7.

Кроме пассивных мультиплексоров OADM на основе TFF-фильтров и AWG-мультиплексоров, выделяют мультиплексор OADM на основе оптического циркулятора и решетки Брэгга (рисунок 1.8).

Отличительной особенностью по конструктивному исполнению мультиплексора OADM от ROADM заключается в том, что в ROADM применяют активные управляющие элементы. В зависимости от функциональности и принципа работы активных элементов, выделяют следующие разновидности ROADM [1,4]:

- 1) на основе волновых блокераторов WB (Wavelength Blocker) и перестраиваемых оптических аттенюаторов VOA (Variable Optical Attenuator);
- 2) на основе микроэлектромеханической системы MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems);
- 3) на основе технологии селекторного переключения спектральных каналов WSS (Wavelength Selective Switch).

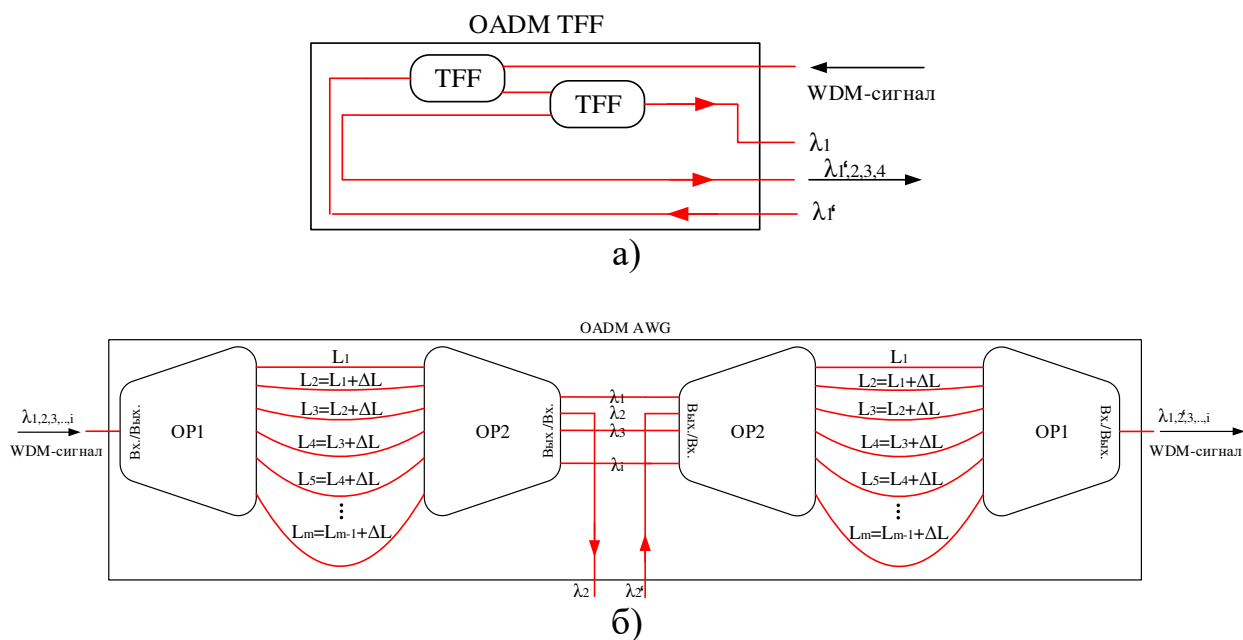


Рисунок 1.7 – Типовая конструкция мультиплексора OADM на основе а) TFF-фильтров, б) AWG-мультиплексоров без ОЭО преобразования

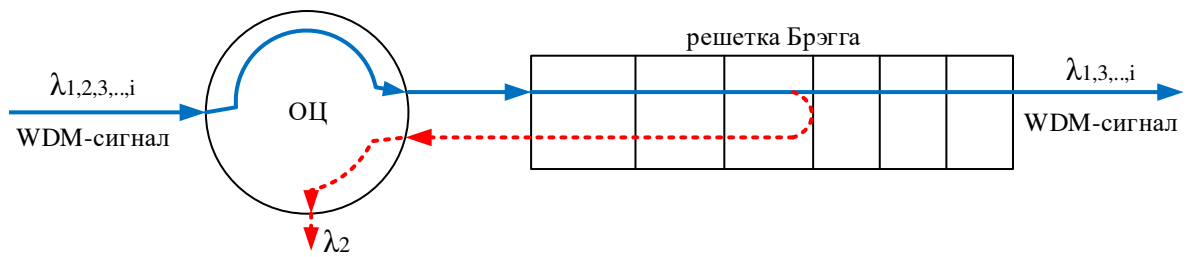


Рисунок 1.8 – Конструктивное исполнение OADM на основе оптического циркулятора и решетки Брэгга

Мультиплексоры ROADM на основе WB и MEMS широкого применения для реализации OADM мультиплексора не нашли, поскольку в WB ROADM для выделения или ввода оптического канала требуются дополнительные промежуточные операции, а MEMS ROADM, за счет своего конструктивного исполнения, нашел широкое применение в оптических кросс-коммутаторах.

Таким образом, на сегодня основной технологией ввода-вывода оптических каналов в ROADM является технология селекторного переключения спектральных каналов WSS. Переключатели WSS могут быть реализованы на основе жидких кристаллов или любого другого механизма, выполняющего фотонную коммутацию. Типовая конструкция ROADM на основе WSS представлена на рисунке 1.9 [1,4].

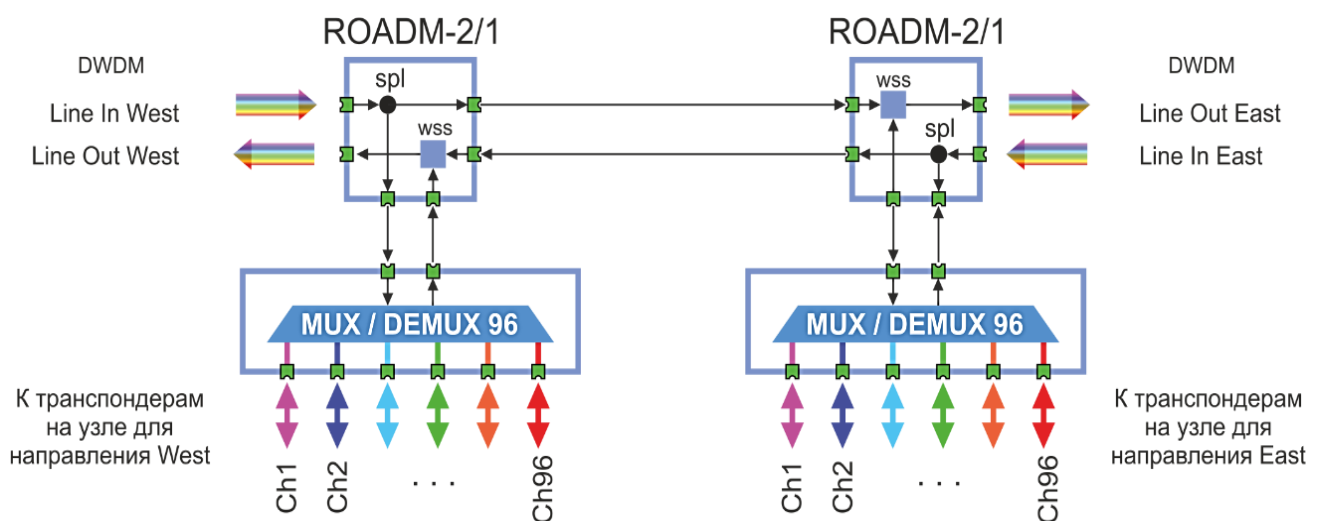


Рисунок 1.9 – Типовая конструкция ROADM на основе WSS

### 1.1.2.2 Оптические волновые конверторы.

Оптический волновой конвертор предназначен для преобразования длины волны канала данных (сервисного сигнала) в длину волны канала WDM согласно частотного плана.

Оптические конверторы делятся на два вида: с оптоэлектрооптическим преобразованием и без преобразования. Оптические конверторы без преобразования строятся на основе полупроводникового усилителя бегущей волны, на основе нелинейных явлениях, например, четырех волнового смешения. Как правило, конвертированный оптический сигнал имеет малую полезную выходную мощность, значение которой в сотни, тысячи раз меньше уровня входного сигнала канала данных, что ведет к затруднению усиления этого сигнала и его передачи по волоконно-оптической линии связи.

Оптические конверторы с оптоэлектрооптическим преобразованием получили название транспондер. Транспондеры широко применяются в системах DWDM и CWDM. Основным преимуществом транспондеров является то, что они выполняют такие функции как:

- регенерация сигнала;
- обнаружение и исправление ошибок;
- ввод электрических и/или оптических сервисных сигналов.

Типовая конструкция транспондера представлена на рисунке 1.10.

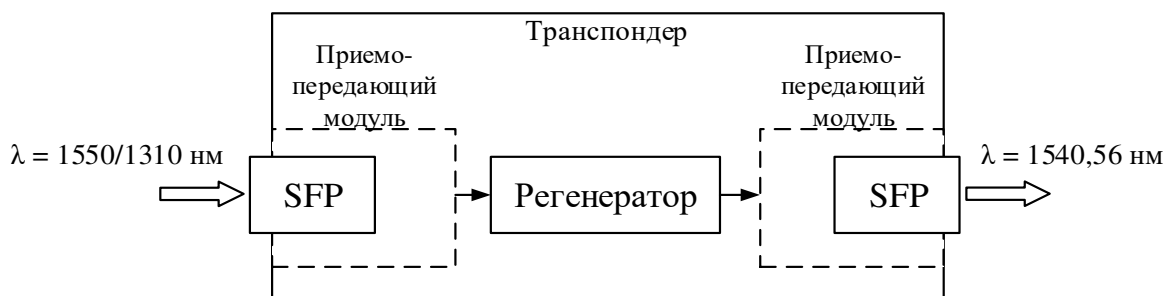


Рисунок 1.20 – Типовая схема транспондера

Особенность конструкции современных транспондеров заключается в

приемно-передающих оптических модулях, либо они интегрированы в транспондер, либо они являются съемными. В качестве съемных модулей выступают SFP модули. Такие модули позволяют строить гибкие, компактные, легко наращиваемые сети WDM. Дело в том, что каждый отдельный SFP модуль предназначен для передачи одного оптического канала согласно частотного плана. Как правило, SFP модули относятся к не перестраиваемым приемо-передающим модулям. Однако на практике встречаются SFP модули, транспондеры с интегрированными приемо-передающими модулями, которые позволяют выполнить перестройку длины волны в пределах нескольких оптических каналов [1-7].

### 1.1.2.3 Оптические усилители.

На длиннопролётных сетях WDM, в частности DWDM, применяют оптические усилители, которые усиливают оптический групповой DWDM сигнал до номинального значения. На сетях CWDM оптические усилители не применяются, в силу того, что требуются усилители с полосой усиления до 300 нм (42,6 ТГц), а применение широкополосных усилителей ведет к искажению амплитудно-волновой характеристике (ABX) линейного WDM сигнала.

Так, в качестве оптических усилителей на сетях DWDM применяются:

- 1) эрбиевый волоконно-оптический усилитель EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier);
- 2) усилитель на основе вынужденного комбинационного рассеяния сигнала (ВКР-усилитель) или рамановский оптический усилитель ROA (Raman Optical Amplifier);
- 3) гибридная связка EDFA и ROA.

Максимальное количество устанавливаемых оптических усилителей между двумя мультиплексорами WDM, как показывает практика, не превышает десяти. Причина тому, наличие спонтанных шумов усилителя. При использовании нескольких усилителей, уровень спонтанного шума каждого отдельно взятого усилителя – аккумулируется, что ведет к уменьшению величины отношения оптической мощности полезного сигнала к мощности оптического шума (OSNR –

Optical Signal-to-Noise Ratio). Чем меньше OSNR, тем больше коэффициент ошибок, по этой причине, длины регенерационного участка на сетях DWDM составляет 600 км, а в некоторых случаях, при использовании современного оборудования, алгоритмов обработки сигнала, может достигать 4000 км. Для сетей CWDM, где не применяются оптические усилители, по некоторым соображениям, длина регенерационного участка не превышает 160 км [6].

#### 1.1.2.4 Компенсаторы дисперсии.

Компенсатор дисперсии – это пассивное устройство, предназначенное для компенсации дисперсии (в частности хроматической дисперсии) на длиннопролётных сетях, а именно сетях DWDM. Компенсаторы дисперсии устанавливаются в усилительных промежуточных пунктах либо в конце трассы перед оптическим мультиплексором. Вносимы оптические потери компенсатора дисперсии в среднем составляет 6 дБ.

По способу компенсации дисперсии, компенсаторы дисперсии делятся на виды:

- компенсатор дисперсии на основе оптоволокна или нелинейного компонента с отрицательной дисперсией;

- компенсатор дисперсии на основе решетки Брэгга.

В некоторых случаях, на длиннопролётных сетях DWDM установка компенсаторов дисперсии не требуется, поскольку транспондеры способны скомпенсировать накопленную дисперсию на электронном уровне, за счет регенерации сигнала.

В отличие от DWDM систем, на сетях CWDM компенсаторы дисперсии не применяются, причина тому – нет жестких требования к стабильности оптической несущей, к спектральной ширине оптического канала и к разносу оптических каналов, кроме этого, длина участка сети между активным оборудованием (мультиплексорами) не превышает 160 км, где накопленная хроматическая дисперсия никак не сказывается на качестве передаваемых данных [1-6].

#### 1.1.2.5 Оптические кросс-коммутаторы.

На магистральных сетях, строящихся по топологиям, где имеются

ответвления, например, топология типа кольцо, звезда или ячеистая топология. В узлах сети, где требуется ответвления (коммутация) оптических каналов, применяются оптические кросс-коммутаторы.

Кросс-коммутатор позволяет коммутировать оптический канал из одного волокна в другое волокно того же кабеля или другого.

По способу коммутации, кросс-коммутаторы делятся на два основных типа: оптомеханические и электрооптические. По времени коммутации, кросс-коммутаторы делятся на четыре вида:

- низкоскоростные, время переключения миллисекунды;
- среднескоростные, время переключения микросекунды;
- высокоскоростные, время переключения наносекунды;
- сверхскоростные, время переключения пикосекунды.

Из перечисленных разновидностей кросс-коммутаторов, в зависимости от достоинств и недостатков, каждый вид кросс-коммутатора применяется в различных компонентах систем DWDM, например, низкоскоростные применяются для резервного переключения плат мультиплексора, среднескоростные – для переключения на резервное оптическое кольцо, высокоскоростные – для коммутации данных, а сверхскоростные – для модуляции оптической несущей [1-6].

Одним из основных видов кросс-коммутаторов, применяемых на сетях DWDM, является кросс-коммутатор, в котором коммутационная матрица построена:

- на основе интерферометра Маха-Цендера (IMZ – Interferomet Mach-Zehnder);
- на основе жидких кристаллов;
- на основе микроэлектромеханической системы MEMS.

Внешний вид коммутационных матриц представлен на рисунке 1.21. Наибольшую популярность получили матрицы на основе IMZ, они применяются в качестве оптических модуляторов. Матриц на основе системы MEMS применяются для переключения оптических колец. В силу сложности изготовления, матрицы на



основе жидких кристаллов не применяются.

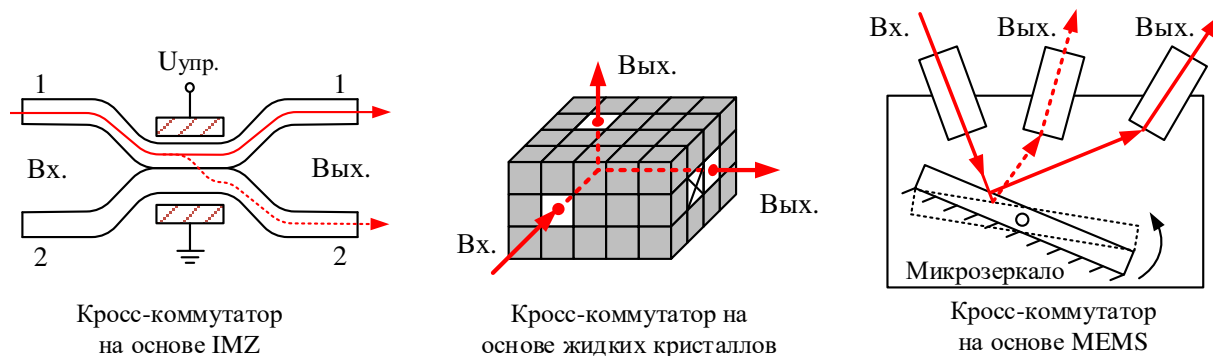


Рисунок 1.21 – Коммутационные матрицы

### 1.1.3 Сетевая конфигурация WDM.

Под сетевой конфигурацией понимают организацию построения сети WDM на основе таких топологий, как линейная цепь, кольцо, ячейка и звезда. Для построения сети WDM различной конфигурации берут за основу базовую конфигурацию терминального мультиплексора WDM (рисунок 1.22). Типовая конфигурация мультиплексора ввода вывода (не перестраиваемый мультиплексор OADM с ОЗО преобразованием) в узле кольцевой топологии сети WDM имеет вид, представленный на рисунке 1.23. Данный тип мультиплексора выполняет не только функцию ввода-вывода данных, но и функцию регенерации сервисных сигналов (WDM-сигнал). При организации ячеистой топологии сети WDM, в узлах ячейки устанавливаются мультиплексоры с функцией регенерации сервисных сигналов, ввода-вывода и электронной (оптической) кросс-коммутации канала данных, данное оборудование получило название оптический кросс-коммутатор (OCS). Типовая конфигурации данного мультиплексора представлена на рисунке 1.24.

На длиннопролетных участках, где мультиплексоры WDM не могут перекрыть полные оптические потери, как правило применяют оптические усилители или можно применение регенераторов, которые представляют собой сборку мультиплексора OADM без ввода-вывода каналов данных, пример представлен на рисунке 1.25 [1-9].

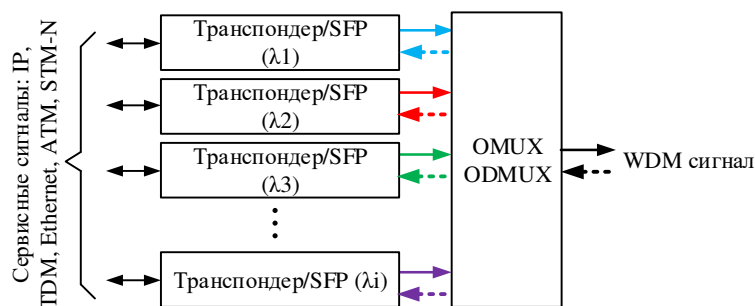


Рисунок 1.22 – Типовая схема организации сети WDM

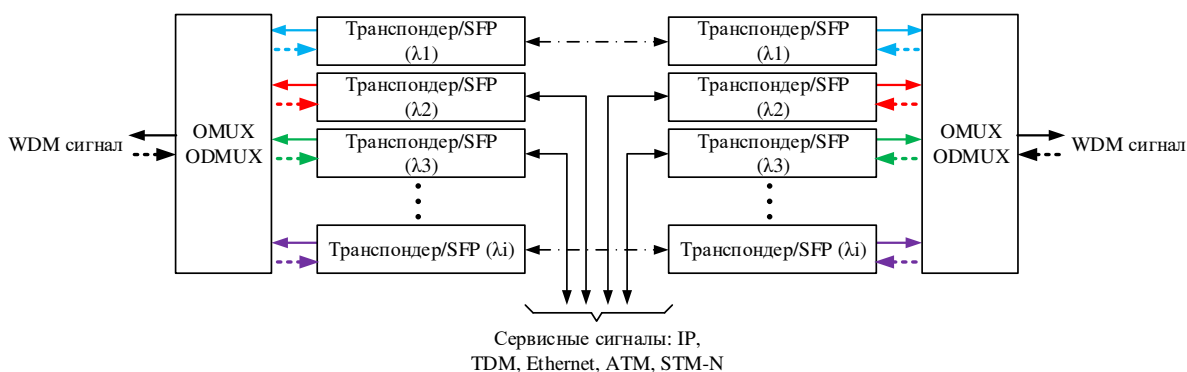


Рисунок 1.23 – Типовая конфигурация OADM в узле кольцевой топологии сети

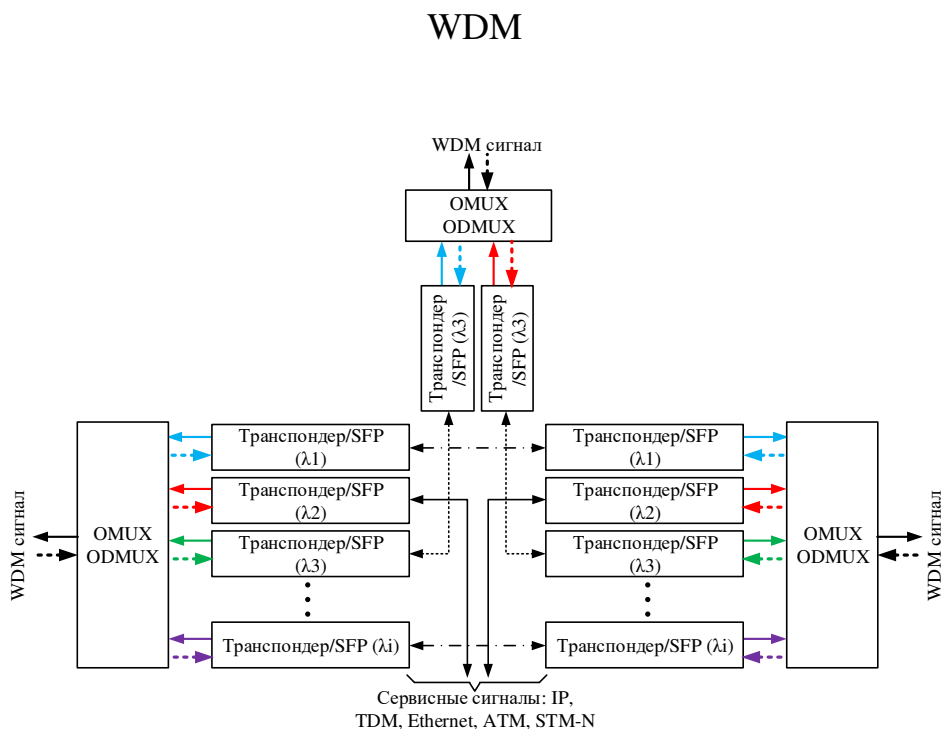


Рисунок 1.24 – Типовая конфигурация OADM в узле ячеистой топологии сети

WDM

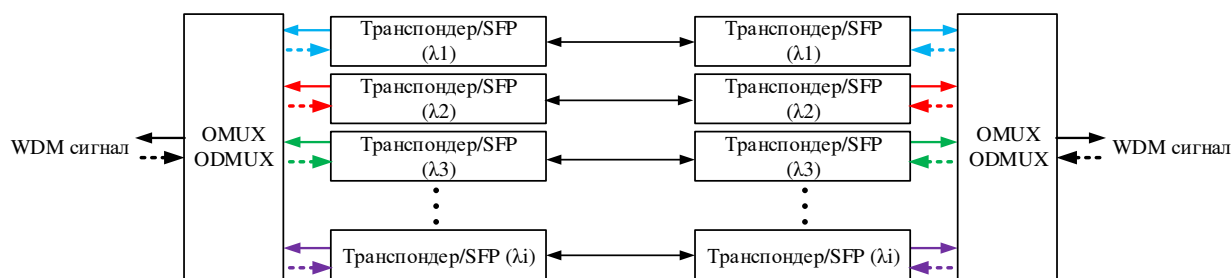


Рисунок 1.25 – Типовая конфигурация регенератора WDM сети

Обобщенная структурная схема сети WDM представлена на рисунке 1.26. На схеме показаны оконечные терминальные мультиплексоры (TM), мультиплексоры ввода-вывода (ADM), регенераторы (REG), мультиплексор с функцией кросс-коммутации (OCS) и оптические усилители (OY).

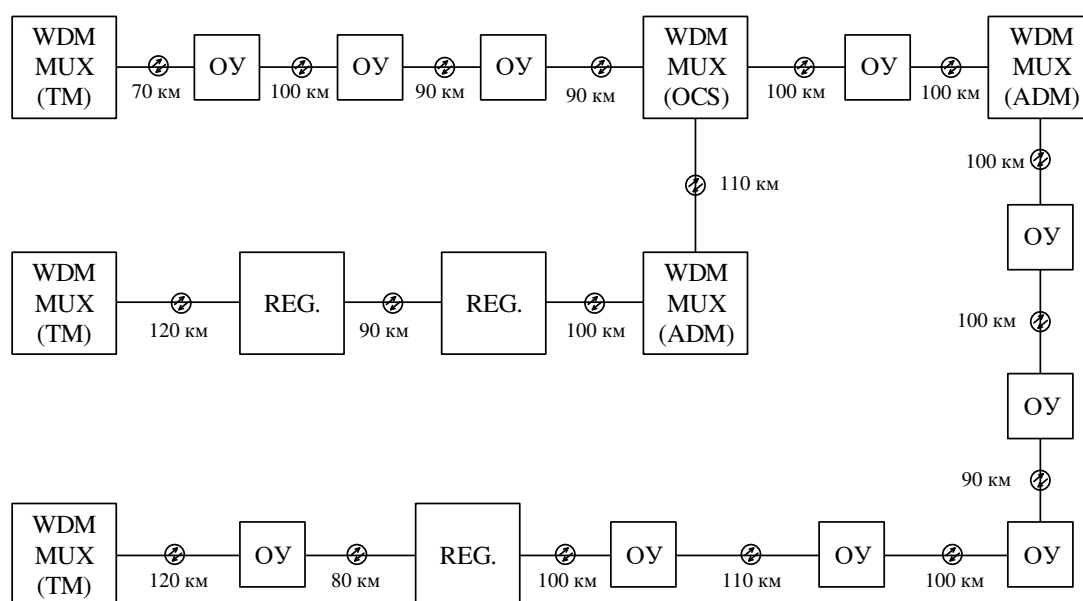


Рисунок 1.26 – Обобщенная структурная схема сети WDM

Как правило, регенераторы на сетях DWDM устанавливаются на расстоянии порядка 600 км, обусловлено это тем, что применяемый оптический усилитель, в частности EDFA, вносит спонтанный шум в полезный сигнал, а если в линии задействовано несколько усилителей, то спонтанный шум аккумулируется, что

ведет к ухудшению параметра сигнал/шум (OSNR) на приемной стороне, а это в свою очередь ведет к росту ошибок. Для коррекции ошибок, на длиннопролетных магистральных линиях связи WDM с оптическими усилителями, рекомендуется установка регенераторов.

Однако, длиннопролетные сети WDM могут строиться на базе регенераторов, в частности это касается сетей CWDM.

Зачастую, реализация мультиплексов ввода-вывода в кольцевых, линейных и ячеистых топологиях выполняется не на основе мультиплексора OADM с ОЭО преобразования, а на основе не перестраиваемого мультиплексора OADM без ОЭО преобразования или перестраиваемого мультиплексора ROADM). Пример сетевой конфигурации участка WDM представлен на рисунке 1.27. На рисунке 1.27 не показаны оптические усилители, поскольку конфигурация данного оборудования не предусмотрена, в силу того, что оптический усилитель сразу усиливает групповой WDM сигнал, а не в отдельности каждый оптический канал [1-9].

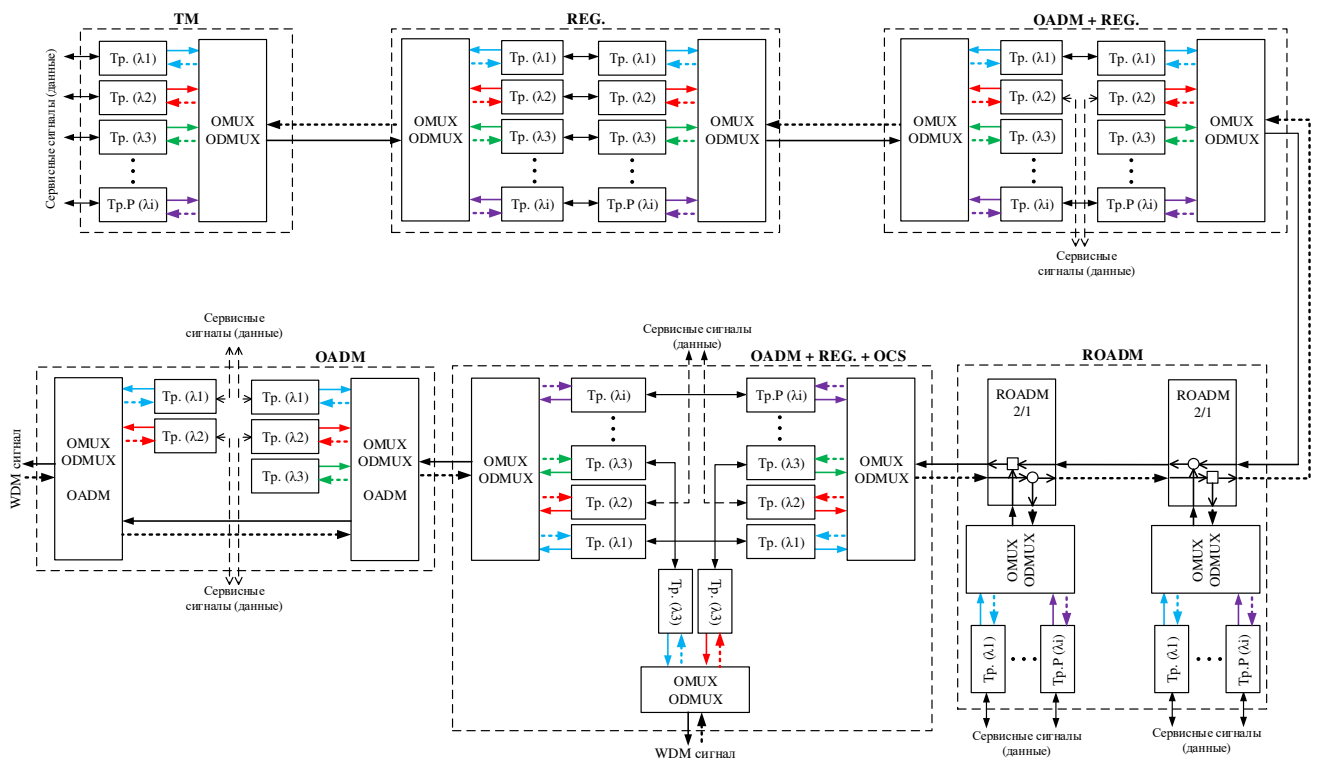


Рисунок 1.27 – Пример сетевой конфигурации участка WDM

### 1.1.4 Многоволновый линейный тракт системы WDM.

Под многоволновым линейным трактом WDM системы понимают комплекс технических средств (оптические мультиплексоры, регенераторы, оптические усилители, кросс-коммутаторы), обеспечивающих передачу каналов данных (сервисных сигналов: IP, STM-N, Ethernet, ATM) на отдельных длинах волн (оптических каналов) в полосе частот оптоволоконной линии со скоростью соответствующей данной системе передачи.

Многоволновый линейный тракт системы WDM включает в себя участки усиления, регенерации и мультиплексирования, оптический путь и оптический канал. Базовая конфигурация линейного тракта WDM представлена на рисунке 1.28 [4,7,10].

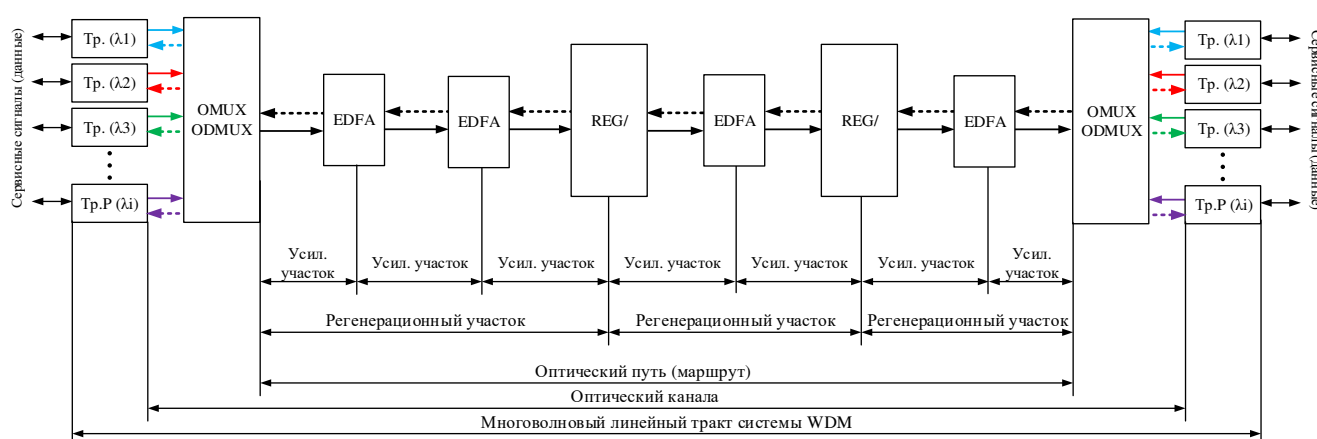


Рисунок 1.28 – Базовая конфигурация линейного тракта WDM

Согласно рекомендации ITU-T G.692 [10], оптический путь (маршрут) – это оптическое соединение между мультиплексором и демультиплексором, а оптический канал – это оптическое соединение между передающим транспондером мультиплексора и приемлющим транспондером демультиплексора. Длина оптического маршрута и канала может достигать 12500 км.

Усилительный участок – это участок между усилителем и усилителем, между усилителем и мультиплексором, между усилителем и регенератором, длина

которого может достигать 160 км. Регенерационный участок – это участок между регенератором и мультиплексором, между регенератором и регенератором, длина которого составляет от 600 км до 2000 км, в зависимости от класса применяемого оборудования.

## 1.2 Резервирования на сетях WDM

### 1.2.1 Обзор существующих схем резервирования.

Одним из основных методов повышения надежности сетей WDM является организация резервирования. В системах WDM применяются следующие виды резервирования [1-13]:

1) сетевое резервирование: каналов данных на электрическом уровне, резервирование оптических каналов, резервирование оптического маршрута;

2) аппаратное резервирование: резервирование отдельных плат аппаратуры WDM, резервирование кабеля связи (оптических волокон).

Как правило, сетевое и аппаратное резервирование выполняется по двум схемам: 1:N и 1+N.

Схема резервирования 1:N означает, что один элемент (компонент) системы передачи WDM является активным (рабочим), остальные N таких же элементов (компонентов) системы находятся в режиме ожидания. Как только основной элемент (компонент) системы станет неработоспособным или будет поврежден, этот поврежденный компонент будет заменен на один из N резервных компонентов, при этом, переключения с поврежденного компонента на резервный выполняется без остановки работы всей сети WDM.

Схема резервирования 1+N означает, что один элемент (компонент) системы передачи WDM является активным (рабочим), остальные N таких же элементов (компонентов) также являются активными, но не основными, то есть принимают сигнал, но не обрабатывают его и не передают на последующие блоки оборудования. Резервные N элементы (компоненты) системы WDM принимают и

обрабатывают сигнал с «худшим» качеством, чем основной компонент. Как только, один из  $N$  резервных компонентов будет принимать сигнал с лучшим качеством чем основной рабочий элемент (компонент) системы WDM, осуществляется автоматическое переключение на резервный компонент. В схеме  $1+N$ , все компоненты, основные и резервные, работают параллельно.

С точки зрения экономичности, низкой стоимости аппаратуры связи WDM, на практике применяю два варианта резервирования:  $1:1$  и  $1+1$ . Как правило, схема резервирования  $1:1$  в сравнении со схемой  $1+1$ , является экономически выгодным, с точки зрения энергопотребления и технической реализации, а это в конечном итоге сказывается на конечной стоимости оборудования WDM. Однако, надежность, качество передаваемого сигнала по схеме резервирования  $1+1$  – выше, по сравнению со схемой  $1:1$ . Не смотря на достоинства и недостатки этих двух вариантов резервирования, схемы резервирования  $1:1$  и  $1+1$  нашли широкое применение на сетях WDM.

Аппаратное резервирование, в частности резервирование плат оборудования, реализуется по схеме  $1:1$ . Как правило, в мультиплексорах резервируются такие платы, как плата питания, плата кросс-коммутации. А вот резервирование волоконно-оптического кабеля связи на участках сети WDM как такового нет. Дело в том, что прокладка второго оптического кабеля ведет к дополнительным финансовым затратам и к будущим трудозатратам по эксплуатации и обслуживанию резервного кабеля (участка сети). Решение этой проблемы является организация кольцевых или ячеистых топологий сети WDM, где один из сегментов кольца или ячейки является основным направлением передачи WDM сигнала, а остальные сегменты являются резервными участками для этого WDM сигнала или основными для других WDM сигналов. На рисунке 1.29 представлена типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом. На рисунке показаны мультиплексоры ввода-вывода и направление передачи WDM сигнала: основное и резервное. В случае повреждения сегмента (участка) кольцевой (ячеистой) топологии сети, осуществляется переключение на резервный участок [1,4,7,11-13].

На сетях WDM линейной топологии или точка-точка, организуют резервирование не оптического кабеля, а оптических волокон в кабеле, при этом, резервные волокна являются не активными (темными), то есть не используются для передачи оптического сигнала. В случае повреждения активного (светлого) оптоволокна или ухудшения качества принимаемого сигнала в активном оптоволокне, происходит переключение на резервное оптическое волокно в этом же кабеле. Такой способ не гарантирует стопроцентное резервирование сети. Поэтому на магистралях, где требуется организация стопроцентной защиты оптического кабеля от обрыва (повреждения), применяют кольцевую или ячеистую топологию сети.

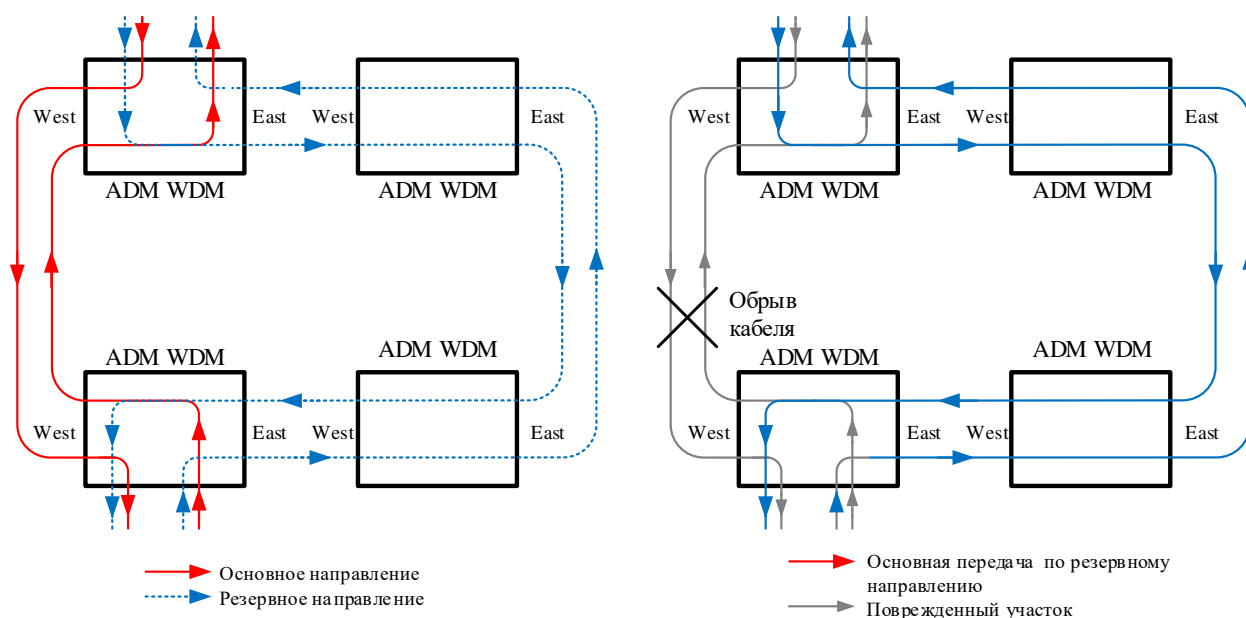


Рисунок 1.29 – Типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом

Данный вид резервирования оптического участка сети WDM подразумевает резервирование не только оптического кабеля и оптоволокна, но и резервирование оптического маршрута. Резервирование оптического маршрута организуется на участке между мультиплексорами WDM. Типовая схема резервирования оптического маршрута по схеме 1:1 и 1+1 представлена на рисунке 1.30.



По схеме 1+1, оптический коммутатор (OS) на передающей стороне производит дублирование трафика WDM и направляет его по двум независимым оптическим волокнам (линиям связи), а на приемной стороне коммутатор выбирает одно из двух волокон (линий связи), где качество WDM сигнала лучше. В схеме 1:1, коммутатор на передающей стороне не производит дублирование WDM сигнала. В случае потери сигнала или ухудшения качества сигнала в рабочей линии, коммутатором автоматически осуществляется переключение на резервную линию связи (оптоволокно). В представленных схемах резервирования оптического маршрута. Как правило, коммутатор OS входит в состав мультиплексора WDM и выполняет функцию оптического кросс-коммутатора OCS [1,4,7,13].

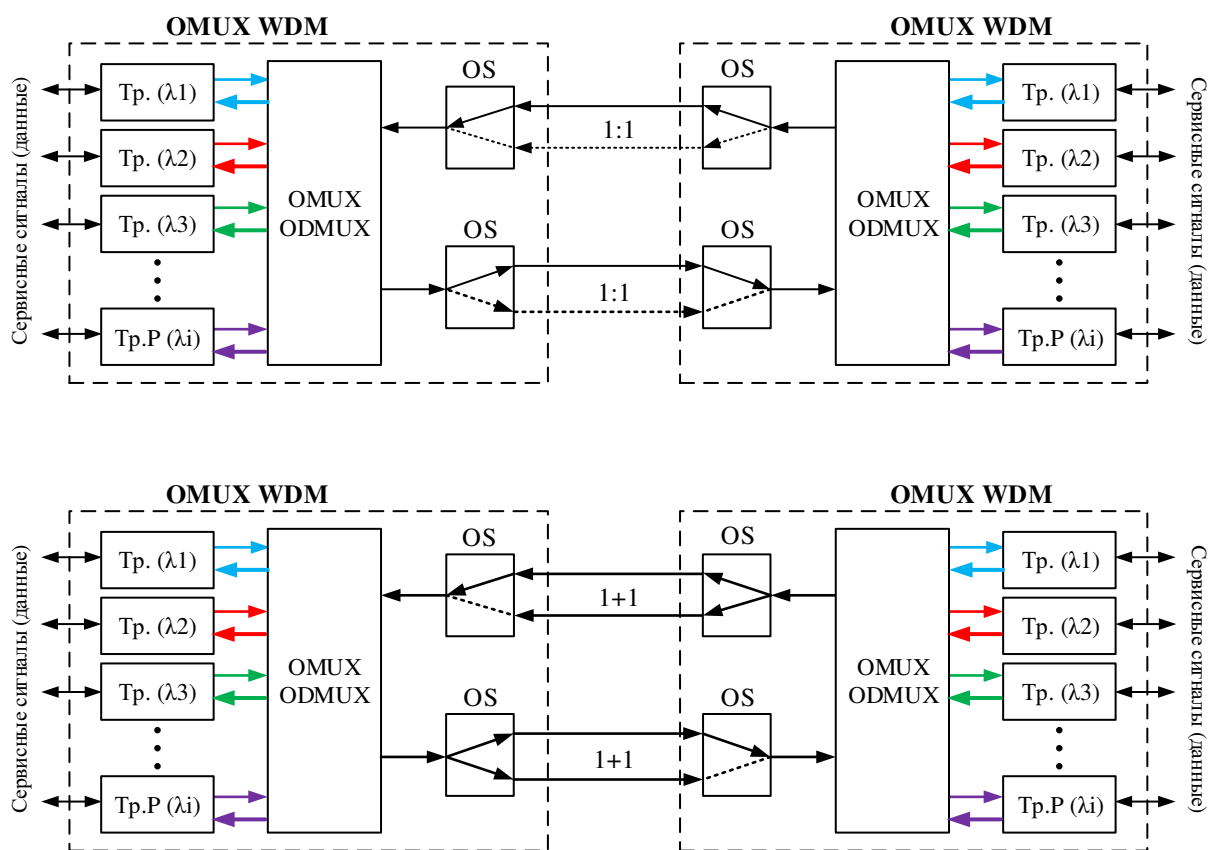


Рисунок 1.31 – Типовая схема резервирования оптического маршрута по схеме 1:1 и 1+1

Схема, представленная на рисунке 1.31, не позволяет организовать защиту

отдельных оптических каналов в случае выхода из строя транспондера. Для защиты оптических каналов также применяют схемы 1+1 и 1:1 как на оптическом, так на электрическом уровне. Конструктивно, защита организуется в транспондере, который дополнительно включает в себя электрический коммутатор (SW), резервный оптический порт, контроллер качества сигнала и управляемые оптические переключатели (OS).

При реализации схемы резервирования 1:1 и 1+1 на электрическом уровне, в транспондере дополнительно применяются такие блоки, как электрический коммутатор (SW), резервный оптический порт и контроллер качества сигнала. Матрица коммутатора в блоке транспондера поддерживает функцию «split and select» (функция раздельного приема электрического сигнала по двум каналам и выбора одного из них), которая работает совместно с контроллером качества сигнала. Схема резервирования оптического канала на электрическом уровне по схеме 1:1 представлена на рисунке 1.32, по схеме 1+1 представлена на рисунке 1.33.

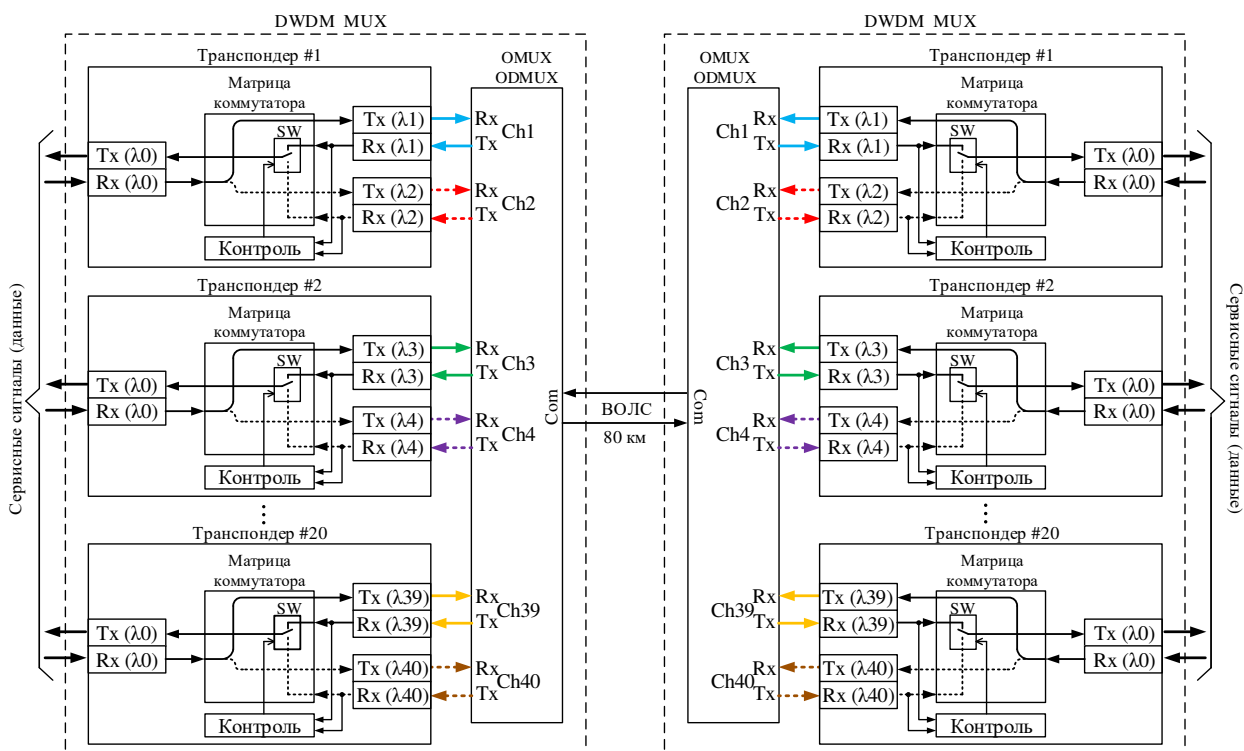


Рисунок 1.32 – Резервирование оптического канала на электрическом уровне по схеме 1:1 в сети WDM топологии «точка-точка»

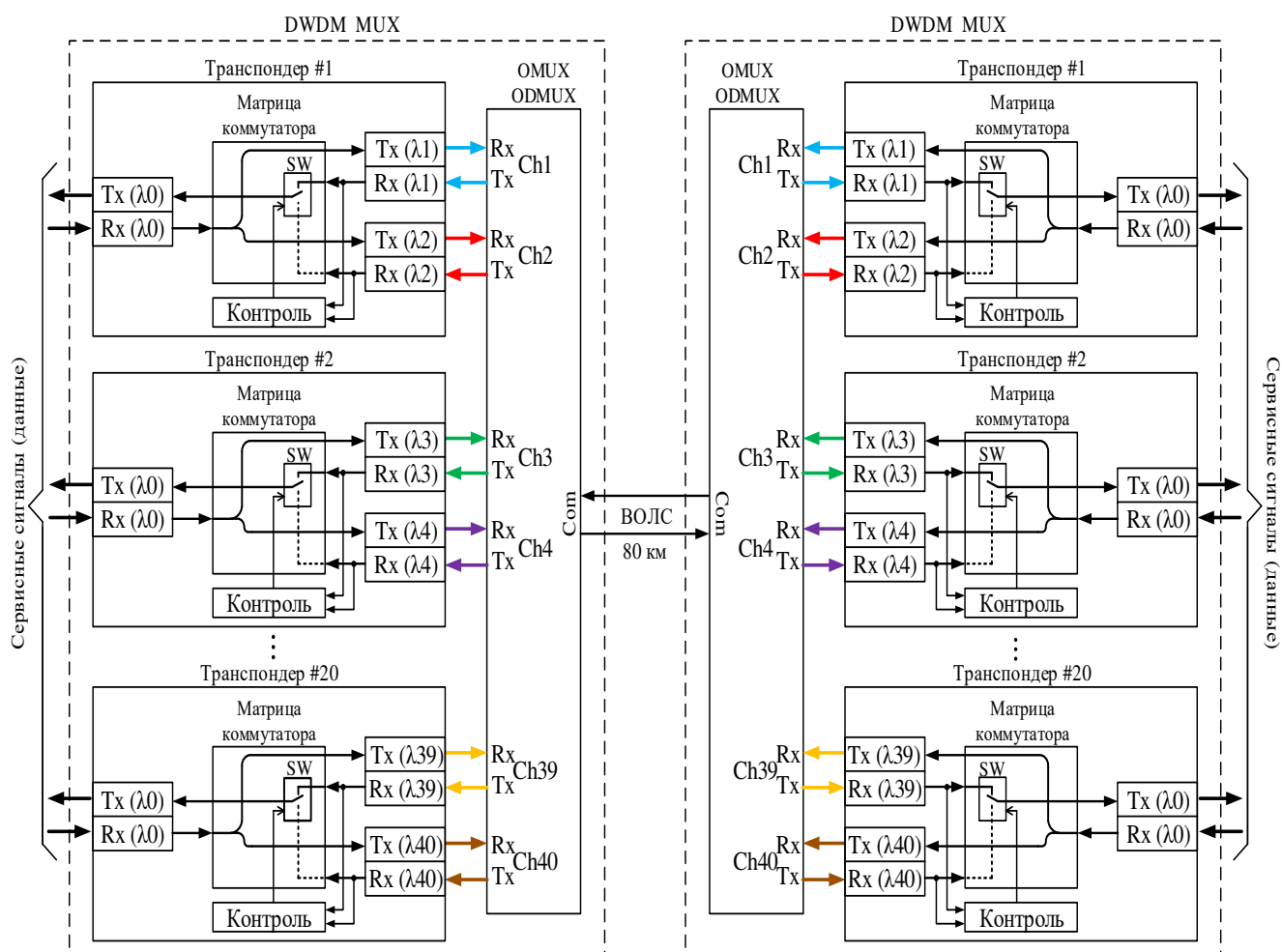


Рисунок 1.33 – Резервирование оптического канала на электрическом уровне по схеме 1+1 в сети WDM топологии «точка-точка»

При реализации схемы резервирования 1:1 и 1+1 на оптическом уровне, в транспондере дополнительно применяются управляемые оптические переключатели (OS). Выбор оптического канала осуществляется с помощью оптического переключателя OS, переключение выполняется со сбойного канала на стабильный канал, канал с лучшим качеством. Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1:1 представлена на рисунке 1.34, по схеме 1+1 представлена на рисунке 1.35. В качестве примера показана схема сети DWDM на 40 оптических каналов, из которых 20 каналов (нечетных) задействовано в качестве основных (рабочих) каналов, и 20 каналов (четных) – в качестве резервных оптических каналов [1-13].

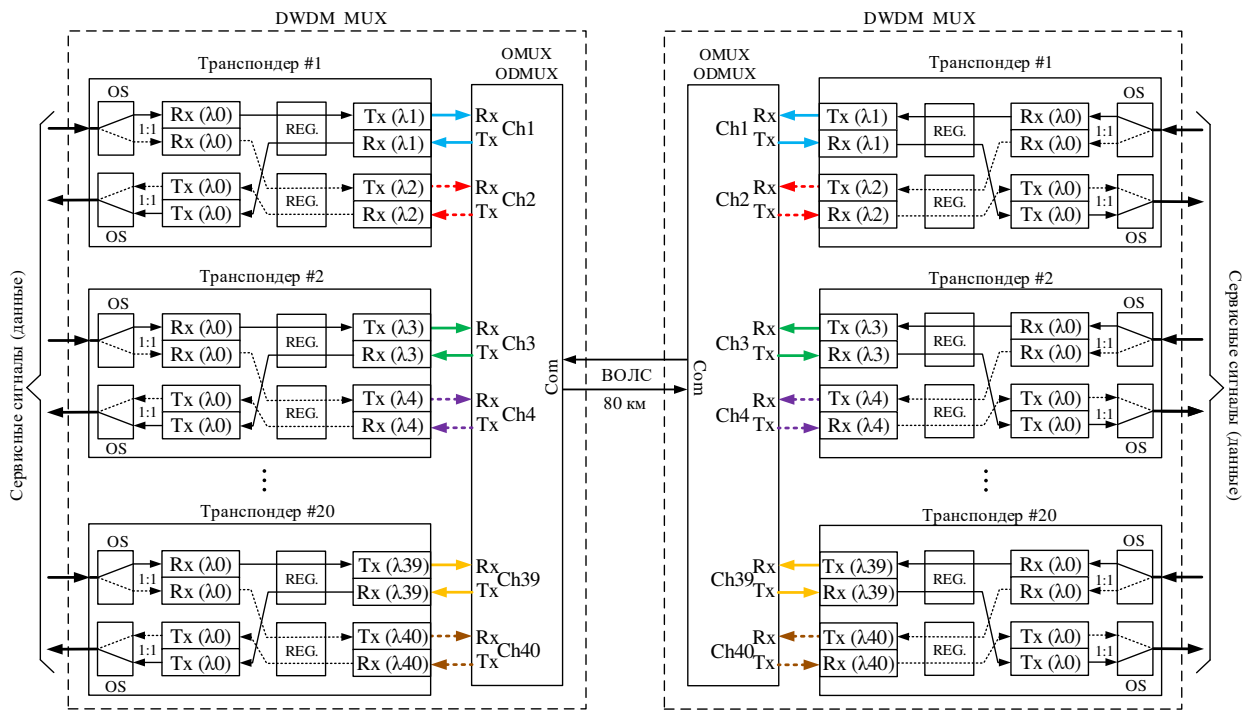


Рисунок 1.34 – Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1:1 в сети WDM топологии «точка-точка»

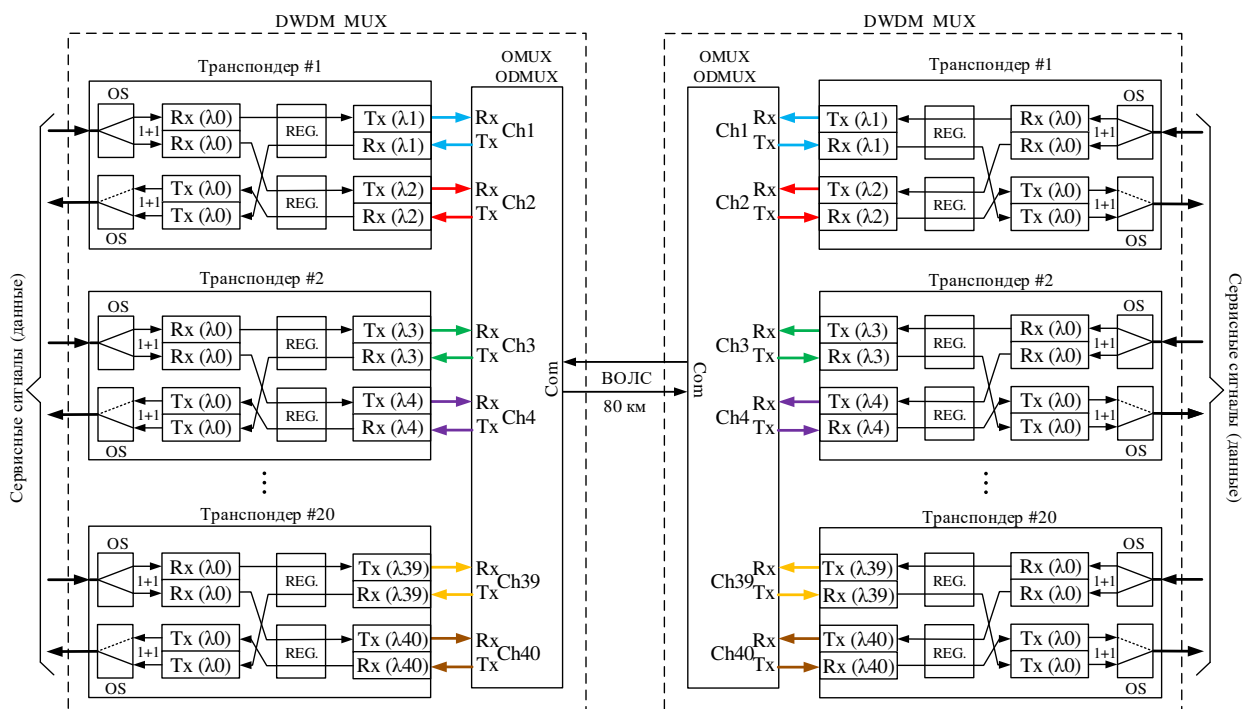


Рисунок 1.35 – Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1+1 в сети WDM топологии «точка-точка»

Рассмотренные варианты схем резервирования оптических каналов WDM, применяются в топологии сети «точка-точка». В случаях организации резервирования оптических каналов в кольцевой или ячеистой топологии, применяются более сложная конфигурация оптических мультиплексоров ввода-вывода, в которых интегрированы оптические кросс-коммутаторы. В качестве примера, рассмотрим участок оптического кольца WDM системы, состоящего из двух мультиплексоров ввода-вывода (рисунок 1.36).

Так, в примере, мультиплексор ввода-вывода MUX WDM #1 выполняет ввод-вывод оптического канала №3 и №4, остальные каналы №1, №2, №5 – № 40 передаются транзитом. Мультиплексор ввода-вывода MUX WDM #2 выполняет ввод-вывод оптического канала №7 и №8, остальные каналы №1 – №6 и №9 – № 40 передаются транзитом. Клиентские каналы данных передаваемые на длинах волн  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  и  $\lambda_7$ ,  $\lambda_8$  организованы с защитой 1+1 на оптическом уровне, но без организации защиты оптических маршрутов между мультиплексорами, как и в примере сети WDM топологии «точка-точка». В системах WDM организация защиты оптических каналов находится в приоритете, чем организация оптических маршрутов, поскольку, сравнивая представленные схемы резервирования между собой, можно выделить слабые звенья в конфигурации мультиплексоров WDM, как терминальных, так и ввода-вывода. К таким звеньям относятся транспондеры и мультиплексоры ROADM, поскольку в этих устройствах применяются активные компоненты, такие как лазерные диода ( $T_x(\lambda_1)$ ), фотодиоды ( $R_x(\lambda_1)$ ), процессоры и микроконтроллеры, регенераторы, электрические коммутаторы (SW) система электропитания, оптические переключатели (OS), селективные переключатели оптических каналов (WSS), которые подвержены большему риску выхода из строя, чем пассивные компоненты [1,3,13].

В транспондерах, при организации резервирования оптического канала, выполняется дублирование компонентов, таких как лазерные диоды, фотодиоды, регенераторы и оптические переключатели в зависимости от оптического или электрического уровня резервирования. Резервирование оптических каналов на оптическом уровне по схеме 1+1 является самым надежным, однако это

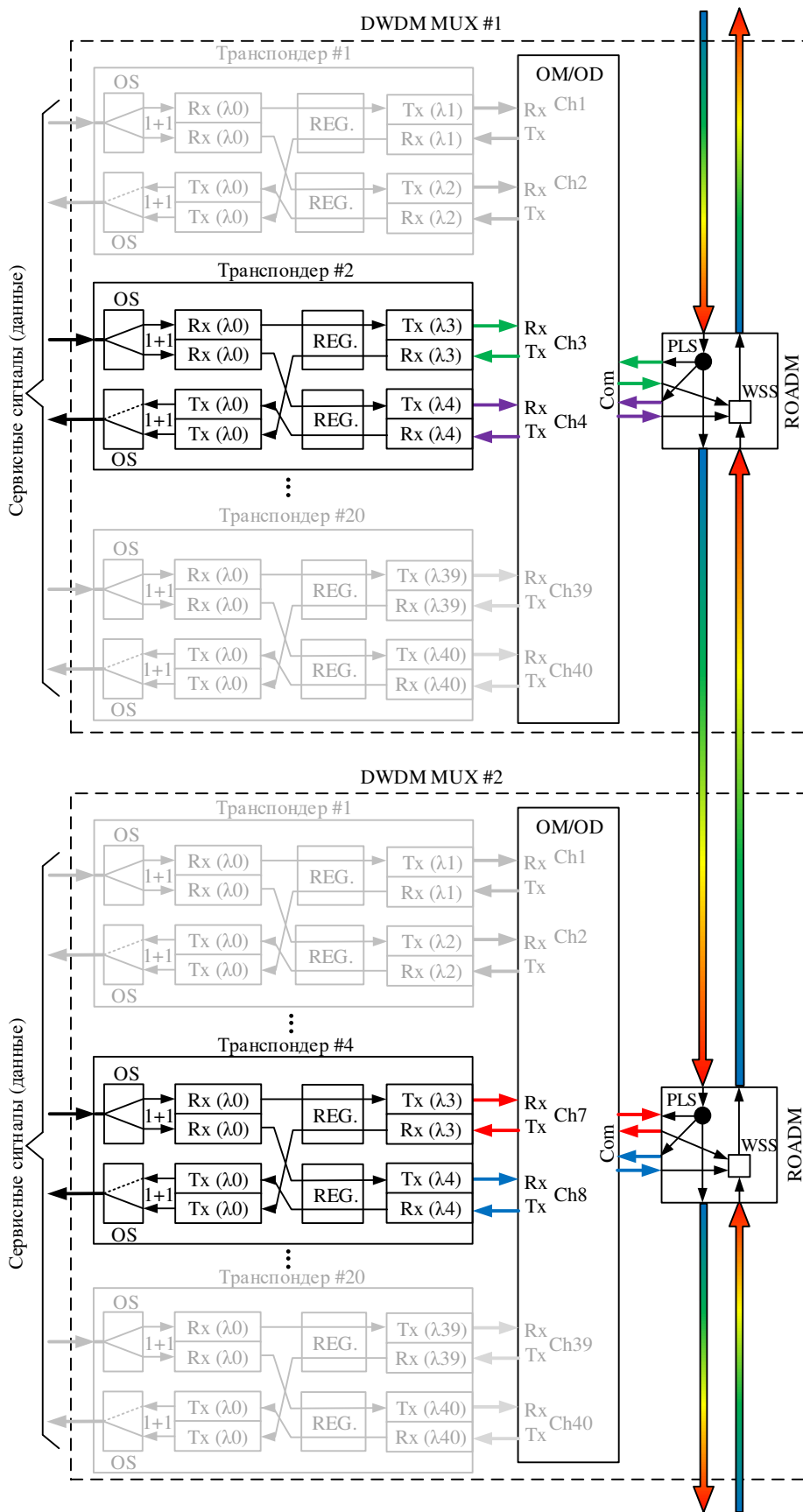


Рисунок 1.36 – Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1+1 на участке кольцевой топологии сети WDM

сказывается на высоко стоимости оборудования, и нецелесообразности схем резервирования 1+1 и 1:1 с точки зрения спектральной эффективности систем DWDM, поскольку из 96 возможных оптических каналов задействуются 43 канала, остальные каналы будут находиться в активном (пассивном) резервировании, что сказывается на уменьшении общей пропускной способности системы DWDM в два раза.

В отличие от транспондера, в мультиплексах ROADM дублирование активных элементов не предусмотрено, обусловлено это сложностью изготовления ROADM мультиплекса и его конечной стоимостью.

В резервировании оптических маршрутов по схемам 1+1 и 1:1 к недостатку можно отнести то, что требуется задействовать четыре оптических волокна, вместо двух при традиционной передаче данных на волоконно-оптических линиях связи.

Общим недостатком резервирования оптических каналов и маршрутов по схемам 1+1 и 1:1, в частности в системах DWDM, является высокая стоимость оборудования. В отличие от систем DWDM, в системах CWDM резервирования оптического маршрута в большинстве случаев организуется на уровне защитного оптического кольца, а защита оптических каналов организуется на стороне клиента (рисунок 1.37) [1,4,13].

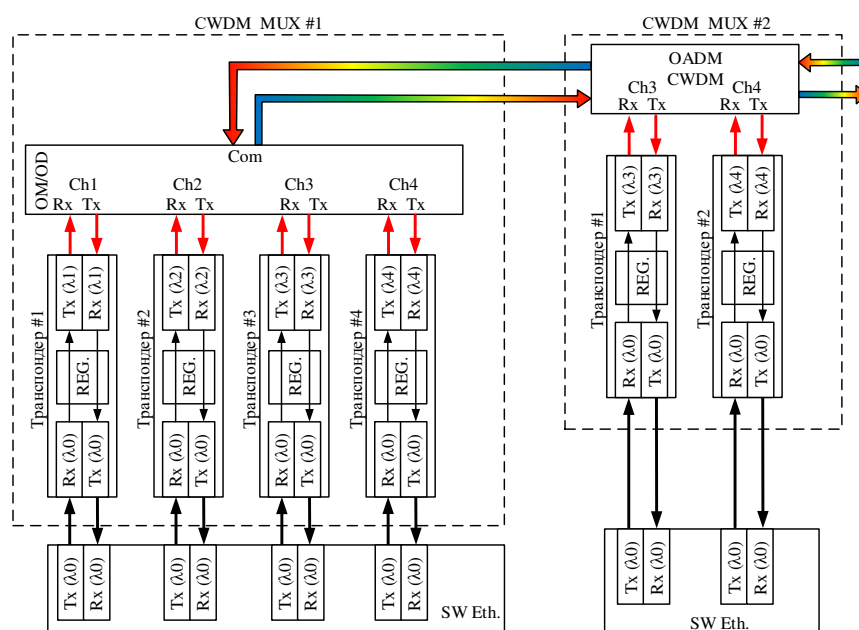


Рисунок 1.37 – Схема резервирования оптических каналов в системе CWDM

Обусловлено это тем, что стоимость оборудования CWDM (компонентов CWDM) ниже стоимости организации резервирования как оптических маршрутов, так и оптических каналов на оптическом и электрическом уровне.

### 1.2.2 Обзор научно-исследовательских работ.

Анализируя научно-исследовательские работы [22-32], в которых представлена работа с технологией WDM (волновое спектральное уплотнение), можно говорить о том, что в анализируемых источниках, все работы ориентированы на совершенствование этих систем, а именно увеличения скорости передачи данных в оптическом канале, на увеличении дальности связи, на новые технологии мультиплексирования, на оценку качества сигнала при влиянии нелинейных явлений.

Так, в научной статье авторов Гайнов В.В., Коньшев В.А., Леонов А.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Скворцов П.И., Трещиков В.Н., Шихалиев И.И., Убайдуллаев Р.Р. «Однопролетные оптические линии связи большой протяженности», теоретически исследованы механизмы деградации сигнала в однопролетных линиях связи с канальной скоростью 100 Гбит/с и когерентным детектированием, ограничивающие предельную длину однопролетных линий. Описаны варианты построения однопролетных линий связи большой протяженности, приведены результаты их экспериментального исследования и показано хорошее совпадение с результатами расчетов. Даны оценки максимальной достижимой длины и пропускной способности рассмотренных вариантов построения однопролетных линий связи. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что при использовании поляризационного мультиплексирования (DP), четырехуровневой фазовой модуляции (QPSK), когерентного детектирования и коррекции ошибок с мягким принятием решений (SoftFEC) в сочетании с волокном стандарта G.652, обладающим ультранизким затуханием, дальность передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Гбит/с в однопролетных линиях связи может превышать 500 км.

В научной статье Портнова Э. Л. и Фатхулина Т. Д. «Технологии достижения высоких скоростей передачи в современных когерентных DWDM-



системах связи» рассмотрены предпосылки к созданию систем со спектральным уплотнением каналов, развитие систем WDM от интенсивного и экстенсивного путей к гибридной модели, а также к совмещению в одной системе передачи как каналов со скоростью передачи 10 Гбит/с с форматом модуляции NRZ, так и каналов со скоростью передачи 40 Гбит/с с форматом модуляции NRZ-ADPSK для модернизации 80 канальных систем. Проанализированы причины перехода от бинарных форматов модуляции к многоуровневым форматам модуляции и использованию когерентных систем связи. Показаны принципы работы когерентных гетеродинных и гомодинных приемников, обеспечивающих скорость передачи информации в одном канале 100 Гбит/с. Проведено сравнение различных форматов модуляции, используемых в современных системах связи, между собой по спектральной эффективности. Выявлены ограничения на максимально допустимую выходную мощность сигнала оптических усилителей, не дающих привести к недопустимому уширению спектра излучения в одном оптическом канале передачи.

В работе автора Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. «Расчет оптических параметров DWDM-системы» предложена методика расчета оптического отношения сигнал/шум для стандартных каналов высокоскоростных систем с N-числом оптических секций. Методика позволяет учитывать помехи, создаваемые распространением света по различным типам оптических волокон.

В диссертационной работе «Разработка методов оценки помехоустойчивости когерентных оптических систем со спектральным уплотнением каналов» автора Р.З. Ибрагимов, целью которой является развитие методологии повышения эффективности оценки когерентных оптических систем путем совместного учета помех, возникающих при передаче цифрового сигнала по протяженным оптическим каналам, получены такие результаты как:

- разработан метод оценки оптического отношения сигнал-шум (OSNR), основанный на стандартизированной методике Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), отличающийся совместным расчетом помех четырехволнового смещения и фазовых искажений, а также стимулированного

рассеяния Рамана в заданном частотном диапазоне, позволяющий обеспечить повышение эффективности расчета вероятности ошибки при проектировании протяженных волоконно-оптических DWDM-систем;

- разработан метод оценки OSNR в магистральных ROADMs;

- разработана методика расчета предельной ширины спектра оптического гетеродина в одноканальной системе;

- разработан алгоритм восстановления фазовых состояний электрического сигнала при использовании оптической модуляции DP-16QAM.

В работе автора Трищев В.Н. «Скоростные DWDM-системы российского производства с канальной скоростью 100 Гбит/с и выше» представлено описание систем DWDM российского производства применяемые ведущими операторами связи России.

В работе авторов Портнов Э.Л., Фатхулин Т.Д. «Анализ разрабатываемых технологий для достижения максимальных скоростей передачи информации в современных DWDM системах» представлен анализ разрабатываемых технологий, на базе которых реализуются современные транспондеры с канальной скоростью 100 Гбит/с обеспечивают скорость передачи до 8,8 Тбит/с, используя C-диапазон и сетку частот с шагом 50 ГГц, и транспондеры реализующие суперканалы со скоростью передачи 1 Тбит/с.

В статье «Анализ структуры ВОЛС с DWDM» автором Храпов С.Д., Латипов О.О., Графова Н.С., Старичихин М.Г. рассмотрены вопросы, связанные с кратким анализом технологией DWDM. Произведен анализ передачи оптического сигнала без воздействия нелинейных искажений.

В работе авторов Sharan L., Shanbhag A.G., Chaubey V.K. «Design and simulation of modified duobinary modulated 40 Gbps 32 channel DWDM optical link for improved non-linear performance», авторов Богданова Е., Сигаев А., Толстихин И «Имитационное моделирование при разработке высокоскоростных систем DWDM» рассматриваются вопросы организации высокоскоростных ВОЛС на базе спектрального мультиплексирования.

В статье «Optical cross connect performance enhancement in optical ring metro

network for extended number of users and different bit rates employment» авторов Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Mohamed Salah Tabour, Ahmed El-Sherbeny представлено моделирование резервирования оптических колец системы DWDM построенной на основе оптических кросс-коммутаторов.

В презентации «WDM the transmode way» представлена информация как о технологии WDM, так и о способах организации резервирования, однако, данные способы являются фундаментальными и описываются в учебниках про оптические сети, например, в литературе авторов Листвин В.Н., Трещиков В.Н. «DWDM системы»; Фокин В.Г. «Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи»; Скляр О. К. «Волоконно-оптические сети и системы связи»; Фокин В.Г. «Когерентные оптические сети»; Цуканов В.Н. «Волоконно-оптическая техника»

В научной работе Duser.M., Bayvel P. «Analysis of a Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture» рассматриваются вопросы оптической коммутации каналов для достижения качества передаваемых сервисов в системах WDM.

### 1.3 Выводы

Существующие схемы резервирования на сетях WDM, в частности DWDM, являются фундаментальными и общеизвестными, исходя из анализа литературы и научных трудов, где рассматриваются вопросы резервирования каналов WDM на оптическом и электрическом уровне и оптических маршрутов WDM по схемам 1+1 и 1:1. Схемы резервирования каналов WDM организуются на уровне транспондеров, в составе которых применяются оптические кросс-коммутаторы, которые также применяются в защите оптических маршрутов WDM. Кроме этого, на практике применяют простейший вариант резервирования оптических каналов и маршрутов – применение кольцевой топологии сети WDM. Анализируя эти

схемы, можно выделить недостаток – это не эффективное использование выделенного частотного диапазона (оптических каналов) и высокая стоимость оборудования за счет применения оптических кросс-коммутаторов. Кроме этого, традиционные способы защиты оптических каналов WDM, не являются гибкими. Дело в том, что в случае аварии на линии или выхода из строя транспондера, в автоматическом режиме нельзя переключиться с одного оптического канала на другой, например, с канала №1 на канал №50. Обусловлено это тем, что оптический канал WDM физически привязан к порту оптического мультиплексора, реализованного либо на технологии TFF, либо AWG. В таких ситуациях, переключение происходит вручную работником связи, занимающегося технической эксплуатацией сети WDM. Решение данной проблемы широко известно, для этого применяют оптические кросс-коммутаторы (OCS) большой емкостью или активные мультиплексоры ввода-вывода ROADM с интегрированными оптическими кросс-коммутаторами малой емкостью. Очевидно, что применение подобного рода оборудования ведет к увеличению стоимости всей сети в целом. Несмотря на это, подобное оборудование применяется на крупных междугородных транспортных магистралях систем DWDM.

Решением подобных проблем, как в учебной, так и в научно-исследовательской литературе не рассматривается. Исходя из этого была предложена идея, в которой организация резервирования каналов и маршрутов WDM будет реализована на основе оптического мультиплексора WDM (TFF или AWG), перестраиваемых транспондеров и дополнительных пассивных компонентов, таких как двухканальный разветвитель и поляризационный сплиттер. В целом, это позволит снизить стоимость всей системы DWDM за счет дешевых компонентов (поляризационный сплиттер, разветвитель 1×2), решить проблему неэффективного использования оптических каналов, а также интегрировать новый вариант схем резервирования в действующие системы связи WDM без существенной реконструкции.

## 2 Разработка новых вариантов схем резервирования каналов WDM

### 2.1 Разработка схем резервирования каналов WDM

Анализируя традиционные схемы резервирования каналов WDM в рассмотренной литературе [1-13] и рекомендациях [14-20], выделяется такая проблема, как неэффективное использования выделенного частотного диапазона в системах DWDM и неэффективное повышение пропускной способности при организации резервирования оптических каналов. Решением подобных проблем является новый подход к организации резервирования оптических каналов, при этом данная проблема решается частично. Отталкиваясь от того, что применяемые компоненты в транспондерах имеют высокую степень наработки на отказ, можно говорить о том, что резервирование каналов WDM достаточно организовывать на электрическом уровне с применением перестраиваемых лазерных диодов типа VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser – лазер с поверхностным излучением и вертикальным резонатором) и пассивных компонентов, таких как оптические разветвители, полупрозрачное зеркало (поляризационный фильтр) и поляризаторы света, схема представлена на рисунке 2.1.

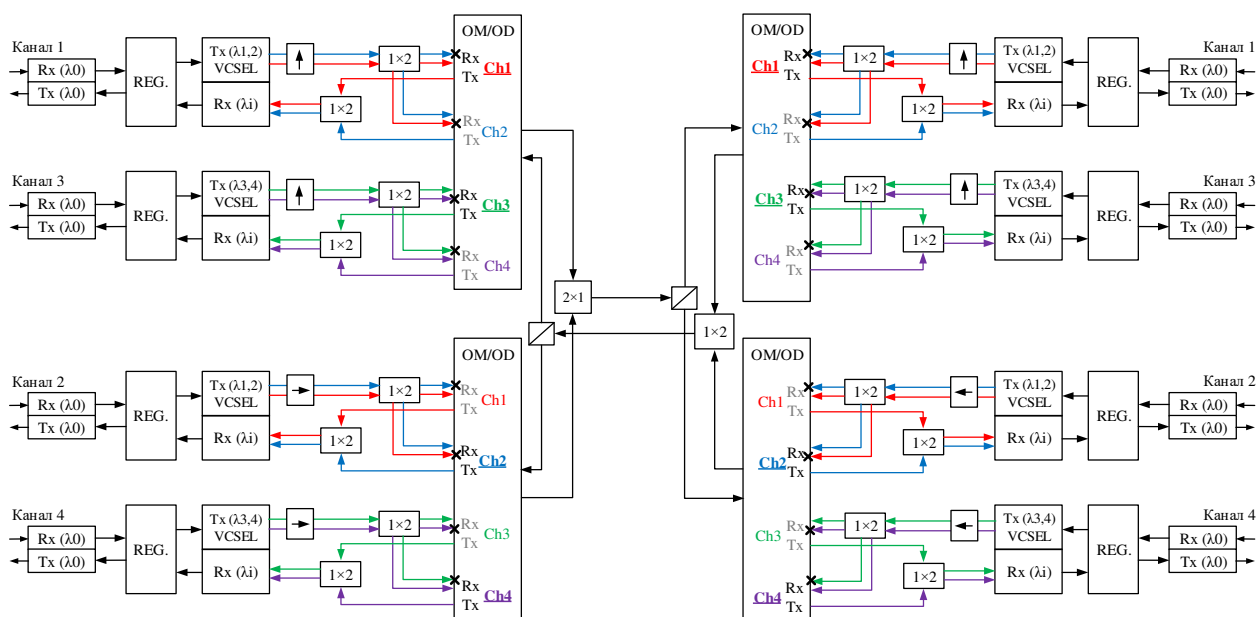


Рисунок 2.1 – Схема резервирования оптических маршрутов (каналов) с применением пассивных компонентов

Применение оптических поляризаторов света, оптических разветвителей  $1 \times 2$  и полупрозрачных зеркал позволяют организовать простейшую модель резервирования оптического канала по схеме как  $1+1$ , так и  $1:1$ , при этом, количество организуемых основных и резервных каналов может составлять 96. Резервные каналы в количестве 96, организуются на тех же длинах волн, что и основные каналы, но с другим типом поляризации оптического сигнала. Поскольку будут передаваться два WDM сигнала с разной поляризацией, требуется задействовать на передающей и приемной стороне два мультиплексора WDM. Верхние мультиплексоры WDM позволяют мультиплексировать и демultipлексировать оптические каналы с вертикальной поляризацией, а нижние мультиплексоры WDM – оптические каналы с горизонтальной поляризацией. Для объединения группового WDM сигнала с разной поляризацией, на выходе мультиплексора WDM устанавливается оптический разветвитель (каплер)  $2 \times 1$ , для разъединения (демultipлексирования) разно поляризованных сигналов WDM, перед демultipлексором WDM устанавливается полупрозрачное зеркало, которое выполняет функцию поляризационного демultipлексора.

При передаче клиентских данных, например, канал 1, по основному оптическому каналу на длине волны  $\lambda_1$ , сигнал с разветвителя  $1 \times 2$  будет поступать на первый и второй оптический порт мультиплексора (Ch1 и Ch2). Поскольку второй порт мультиплексора настроен на длину волны  $\lambda_2$ , сигнал на длине волны  $\lambda_1$  будет подвержен переходному затуханию этого порта, что приведет к блокировке сигнала на длине волны  $\lambda_1$  на оптическом порту мультиплексора Ch2, как показано на рисунке 2.9. На приемной стороне, ситуация аналогичная, сигнал на длине волны  $\lambda_1$  будет наблюдаться на выходе оптического порта Ch1, а на выходе порта Ch2 сигнал на длине волны  $\lambda_1$  будет заблокирован.

Если требуется передача клиентских данных (канал 1) по резервному каналу на  $\lambda_2$ , на приемной стороне осуществляется перестройка лазер VCSEL, с длины волны  $\lambda_1$  на длину  $\lambda_2$ . Физика передача оптического сигналов на резервной длине волны  $\lambda_2$  для клиентского канала №1 аналогичная длине волны  $\lambda_1$ . При этом, сигнал на длине волны  $\lambda_2$  с вертикальной поляризацией, в теории, не мешает

сигналу на длине волны  $\lambda_2$  с горизонтальной поляризацией для клиентского канала №3.

Представленный вариант резервирования канала WDM не гарантирует стопроцентный резерв, поскольку на участке между транспондером и мультиплексором задействован один лазерный диод и фотодиод, не смотря на их высокую степень наработки на отказ. Кроме этого, разработанный вариант резервирования оптического канала эквивалентен резервированию оптического маршрута системы WDM, что практичнее организовать резервирование по схеме, представленной на рисунке 1.31.

Повышение надежности разработанной схемы резервирования (рисунок 2.1) требует доработки. Для этого необходимо задействовать два источника оптического излучения и два фотодиода на участке мультиплексор – транспондер, при этом, применение перестраиваемых источников излучения (VCSEL) не требуется. В таком случае получаем схему резервирования оптических каналов на электрическом уровне. Типовая схема на четыре канала представлена на рисунке 2.10, при этом, могут быть задействованы все 96 оптических каналов.

Представленное резервирование оптических каналов на рисунке 2.2 может организовываться как по схеме 1:1, так и по схеме 1+1. Однако, схема, представленная на рисунке 2.2, как и схема на рисунке 2.1, не гарантирует стопроцентное резервирование оптического канала. В этом случае, схему, представленную на рисунке 2.2 также можно доработать до уровня стопроцентного резервирования оптического канала.

Для этого требуется со стороны клиента задействовать два оптических переключателя, два фотодиода и два лазерного диода. Схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне, которая позволяет задействовать все каналы системы DWDM согласно рекомендации ITU-T G.694, представлена на рисунке 2.3. Данная схема может работать как по схеме 1+1, так и по схеме 1:1. Однако, разработанные схемы (рисунок 2.1 – 2.3), в которых применяется поляризационное мультиплексирование и демультиплексирование посредством разветвителя  $2 \times 1$  и полупрозрачным зеркалом, не позволяют организовать

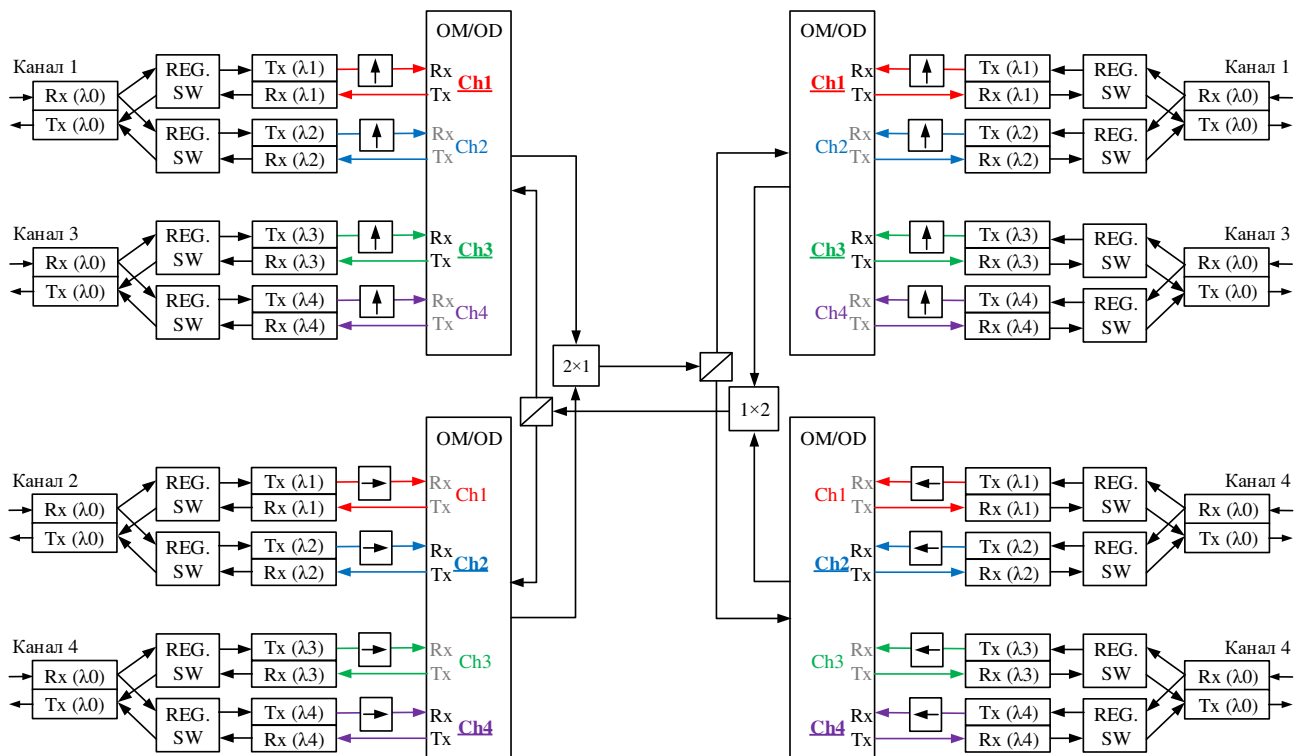


Рисунок 2.2 – Структурная схема резервирования оптических каналов на электрическом уровне с применением пассивных компонентов

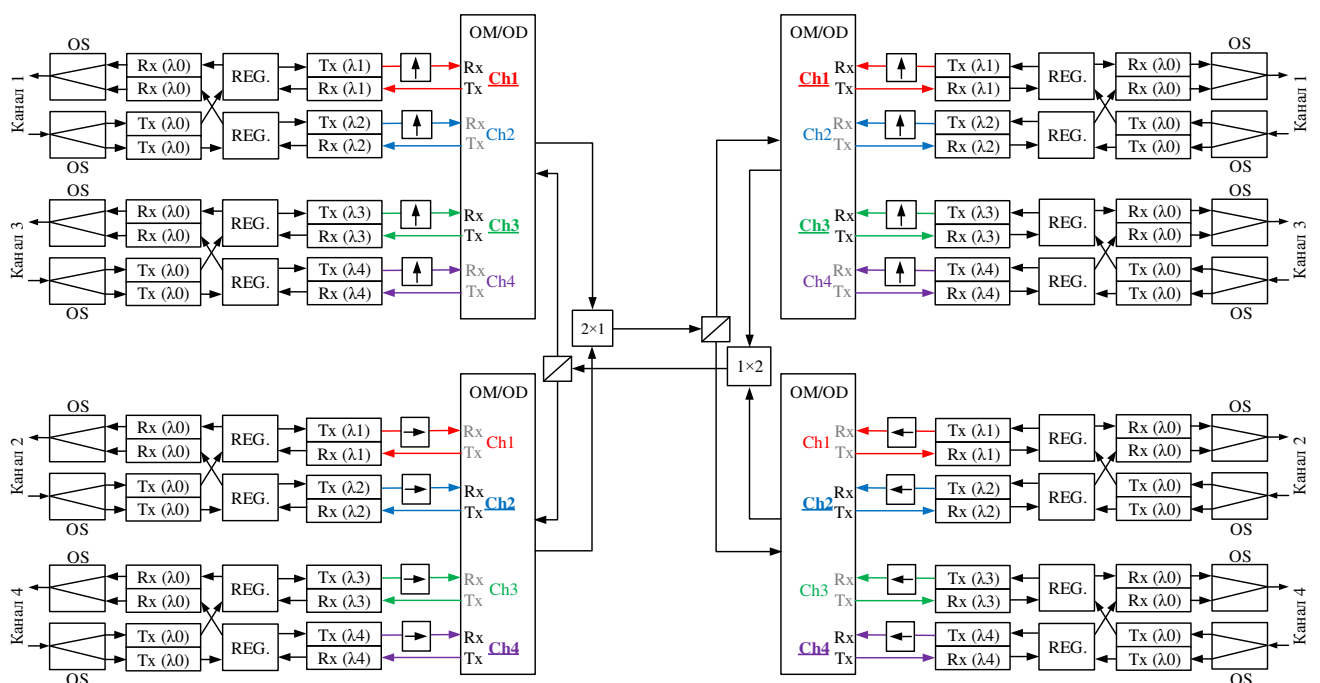


Рисунок 2.3 – Структурная схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с применением пассивных компонентов



передачу оптических каналов WDM с такими форматами модуляции как DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-32QAM, которые организуют передачу клиентских данных со скоростью от 100 Гбит/с до 400 Гбит/с [21]. Обусловлено это тем, что в данных форматах модуляции применяется двойная поляризация (DP - Double Polarization) оптического сигнала, что критично скажется на передаче и приеме такого формата сигнала в данных схемах. Применение таких схем резервирования ориентировано на резервирование оптических каналов с амплитудной или фазовой модуляцией оптической несущей пропускной способностью десятки гигабит в секунду. Кроме этого, как поведет себя процесс мультиплексирования и демуплексирования поляризационных WDM сигналов на практике, остается открытым вопросом и требует проведения математического моделирования для оценки качественных показателей системы WDM, а именно коэффициента ошибок.

Кроме такой модели организации резервирования оптических каналов, можно представить модель с резервированием оптических каналов на уровне транспондера, где резервирование организуется не отдельных компонентов транспондера, а резервирование всего транспондера. В схемах, рисунок 1.32 – 1.35, при «полном» выходе из строя одно из транспондеров, например, откажет система электропитания одного из транспондеров, произойдет потеря двух оптических каналов. В таком случае, восстановление работоспособности оптического канала возможно в кольцевой (ячеистой) топологии за счет перенаправлен оптического канала по резервному оптическому маршруту (сегменту оптического кольца). В случае такой аварии на сетях WDM линейной топологии, можно задействовать схему представленной на рисунке 2.1 без поляризаторов и поляризационных сплиттеров. Для стопроцентного резервирования оптического канала на оптическом уровне требуется дополнительная организация резервного оптического порта со стороны клиента. Типовая схема резервирования представлена на рисунке 2.4. Применение такой схемы вновь приводит к неэффективному использованию выделенного частотного диапазона, то есть половина оптических каналов будет не задействована. Схема резервирования, представленная на рисунке 2.4, может работать в режиме как 1+1, так и 1:1.

Пример защиты оптических каналов в сети WDM линейной топологии, с применением схемы резервирования оптических каналов на уровне транспондеров, представлен на рисунке 2.5.

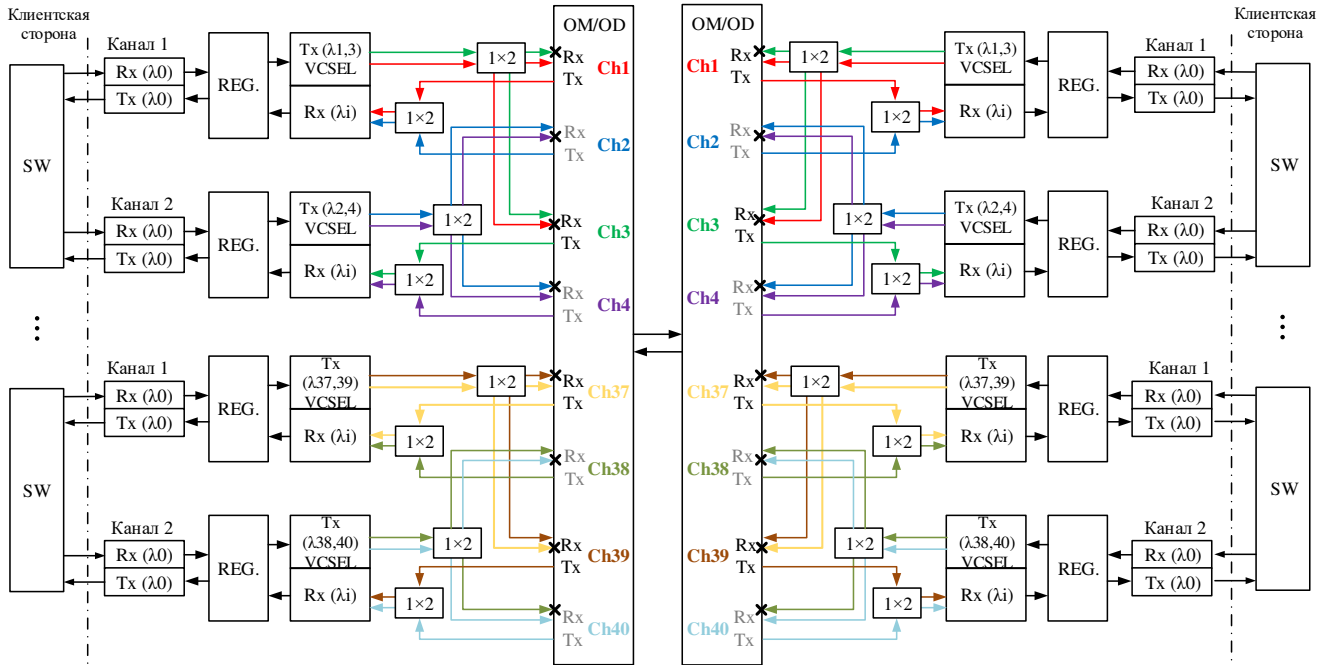


Рисунок 2.4 – Структурная схема резервирования оптических каналов на уровне транспондеров

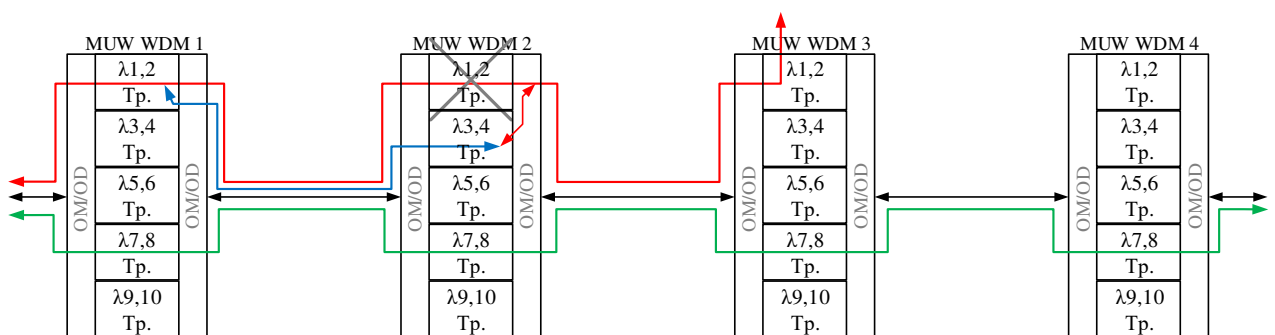


Рисунок 2.5 – Резервирование оптических каналов WDM в линейной топологии, на уровне транспондеров

Такой подход к резервированию ориентирован на оптические каналы с

высоким приоритетом. В данном примере, длина волны  $\lambda_{3,4}$  на участке мультиплексора WDM MUX 1 и WDM MUX 2, на которой передавались данные клиента с низким приоритетом, будет задействована для передачи данных клиента с высоким приоритетом.

Если совместить разработанные схемы, которые представлены на рисунках 2.3 и 2.4, получим схему стопроцентного резервирования оптических каналов WDM на оптическом уровне и уровне транспондера (рисунок 2.6), что позволит реализовать сеть DWDM с задействованием всех 96 оптических каналов, но пропускной способностью на канал не более 40 Гбит/с. Как было ранее сказано, скорость оптического канала в данной схеме ограничивается форматом модуляции оптической несущей, а качественные показатели возможностью мультиплексирования и демультиплексирования поляризованных WDM сигналов, что требует провести моделирование разработанных схем с целью оценки применимости этих схем резервирования на практике.

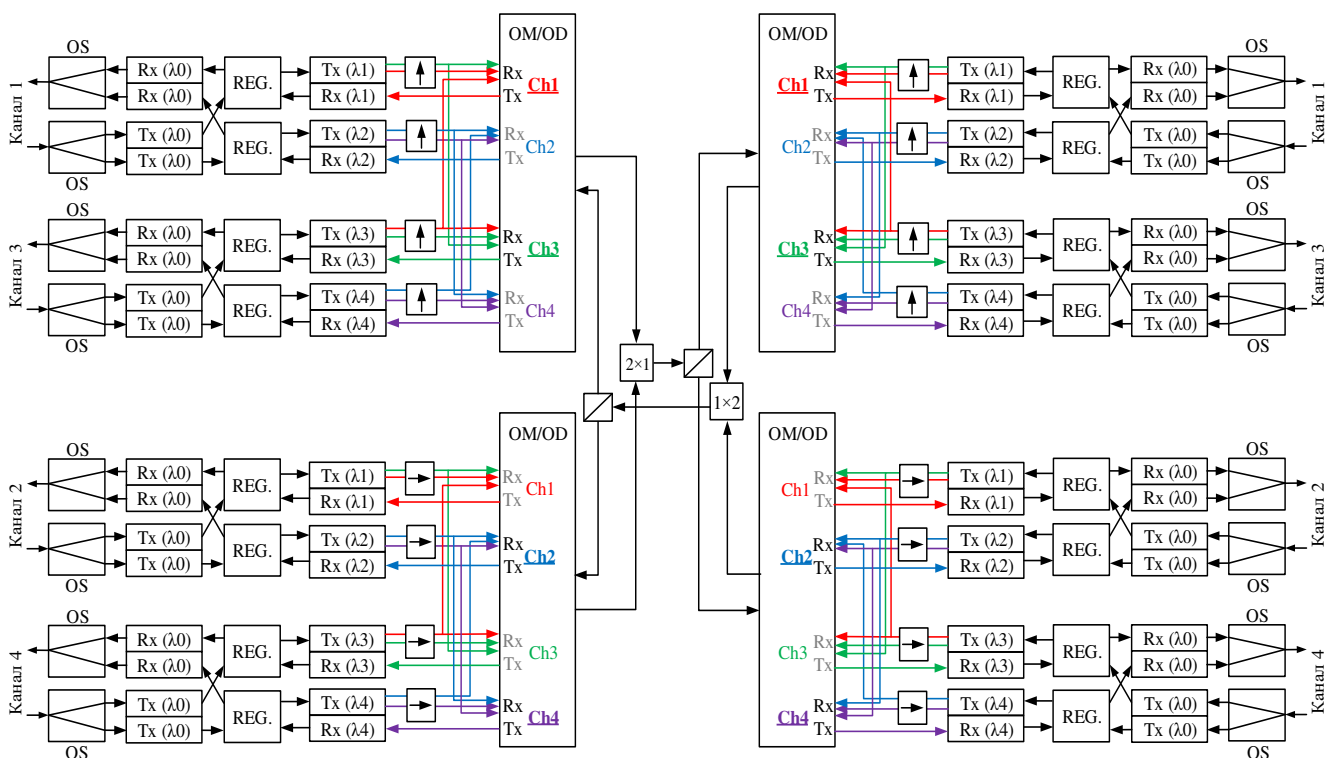


Рисунок 2.6 – Схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с резервированием транспондеров на основе пассивных компонентов

## 2.2 Выводы

Разработанные схемы резервирования оптических каналов и маршрутов WDM, которые реализованы на основе пассивных компонентов, таких как оптический поляризатор, оптический разветвитель 1×2 и поляризационный сплиттер, позволяют реализовать стопроцентное резервирование всех оптических каналов системы DWDM без применения дорогостоящих оптических кросс-коммутаторов большой емкости и активных мультиплексоров ввода-вывода ROADM, решить проблему эффективного использования всех оптических каналов за счет передачи основного и резервного канала в разно поляризованных каналах WDM, когда в традиционных схемах, из 96 возможных каналов, 48 каналов отводится на резерв и 48 для передачи данных.

Стоит отметить тот факт, что резервирование будет реализовано на основе перестраиваемых транспондерах, в которых применяются такие источники излучения, как лазерные диоды с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL). Несмотря на то, что стоимость этих лазеров выше, по сравнению с РБО-лазером (часто применяемых в системах DWDM), общая стоимости системы DWDM, у которой резервирование будет реализовано на основе этих компонентов, будет меньше, в отличии от применения оптических кросс-коммутаторов большой емкости и мультиплексоров ROADM. Также стоит отметить, что интеграция новых схем резервирования влечет к модернизации программного обеспечения, которое будет отвечать за управления транспондерами.

Для проверки работоспособности разработанных схем резервирования, для оценки применимости их на практике, требуется провести моделирования в среде САПР (Система Автоматизации Проектных Работ).

### 3 Моделирование новых схем резервирования каналов WDM

#### 3.1 Постановка задачи

Для оценки применимости разработанных схем резервирования оптических каналов WDM на практике, следует выполнить математическое моделирование. Моделирование будет проводиться при следующих условиях:

1) для простоты моделирования рассмотрим сеть DWDM топологии «линейная цепь» с одним промежуточным узлом без усилительных пунктов;

2) длину секции мультиплексирования принять равной 80 км, обуславливается это тем, что среднее значение энергетического потенциала системы передачи DWDM, значение которого составляет 28 дБ, позволяет перекрыть длину волоконно-оптической линии до 90 км, в зависимости от коэффициента километрического затухания оптоволокна;

3) частотная сетка DWDM системы соответствует шагу 100 ГГц (0,8 нм) на основании того, что большинство применяемого на практике оборудования DWDM работает в данной частотной сетке;

4) из-за ограничения производительности вычислительной машины, число мультиплексируемых каналов примем равным четырем;

5) в качестве линейного кодирования целесообразно применить коды форматов RZ или NRZ, как самые распространённый и простой формат линейного кодирования;

6) для меньшего влияния перекрестных помех и межсимвольной интерференции на качество связи, скорость интерфейсного потока примем равной 10 Гбит/с;

7) тип волокна – одномодовое стандартное волокно рекомендации ITU-T G.652

8) моделирование резервирования на уровне транспондеров рассматриваться не будет, на основании того, что данный способ резервирования является традиционным и применяется на практике;

9) для ухода от громоздкости схем (кода программы), целесообразно рассмотреть симплексный режим передачи четырех каналов WDM.

На основании приведённых условий моделирования, в работе будут рассмотрено моделирование схем резервирования оптических каналов, представленных на рисунке 2.1, 2.4 и 2.6. Обосновано это тем, что для схем резервирования представленных на рисунке 2.2, 2.3 и 2.6 – однотипны, разница только в резервировании на уровне транспондеров, а согласно представленным условиям моделирования, моделирование транспондеров рассматриваться не будет. Далее, схемы, показанные на рисунках 2.1, 2.5 и 2.6 будут называться как схемы резервирования оптического канала первой, второй и соответственно третьей версией.

Применимости на практике разработанных схем резервирования оптических каналов WDM следует оценивать исходя из фундаментальных параметров канала связи, таких как коэффициент ошибок и глаз-диаграммы.

### 3.2 Выбор программного обеспечения для моделирования

Программное обеспечение для моделирования разработанных схем резервирования каналов WDM целесообразно выбирать из линейки прикладных программ, относящихся к системам автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют моделировать как телекоммуникационные сети в целом, так отдельные узлы и компоненты этой сети. К таким программным продуктам относят:

- 1) Matlab Simulink;
- 2) LabVIEW;
- 3) OptiSystem;

Перспективным вариантом считается система автоматизированного проектирования OptiSystem, поскольку она ориентирована на решение сложные задачи по разработке, моделированию, тестированию и оптимизации различных

видов оптических линий связи от систем кабельного телевидения до магистральных линий связи стандарта DWDM.

Программного обеспечения OptiSystem содержит большую библиотеку активных и пассивных компонентов, которые имеют частотно-зависимые и динамически параметры, что позволяет исследовать влияние технических характеристик компонентов на работу ВОСП. Применение САПР OptiSystem позволяет быстро и дешево разработать натурную модель сети, позволяет понять протекание процессов как в отдельных блоках, так в системе в целом, а прямой доступ к многочисленным настройкам данных, определяющих характеристики ВОСП, позволяет выполнить «глубокое» исследование оптической системы.

В состав САПР OptiSystem входит большое разнообразие оптических и электрических компонентов, на базе которых выполняется разработка не только оптических транспортных системы связи и сети доступа, но и разработка передатчиков и приемников, усилителей, компенсаторов дисперсии, оптических волокон, фильтров, мультиплексоров. Для оценки работоспособности сети или отдельного блока (компонента), в составе программного обеспечения OptiSystem имеются виртуальные приборы для измерения коэффициента ошибок, уровня оптического сигнала, для снятия глаз-диаграммы, для анализа спектра сигнала [22].

Графический интерфейс программы OptiSystem интуитивен и прост, внешний вид которого представлен на рисунке 3.1. Интерфейс состоит из четырех полей. Первое поле представляет собой меню программы, во втором поле представлена библиотека САПР OptiSystem, в третьем поле разрабатывается блок-диаграмма исследуемой линии связи или отдельного компонента этой линии, в четвертом поле представлены инструмент для визуализации блок-схемы.

Библиотека представляет собой пять компонентов, четыре из которых («Custom», «Favorites», «Recently used», «Subsystems») являются пустыми и предназначены для пользовательских разработок. Библиотека «Default» представляет собой список активных и пассивных компонентов на основе которых разрабатываются блок-схемы электрических, оптических и электрооптических узлов телекоммуникационного оборудования. Структура библиотеки «Default»

представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.1 – Интерфейс программы OptiSystem

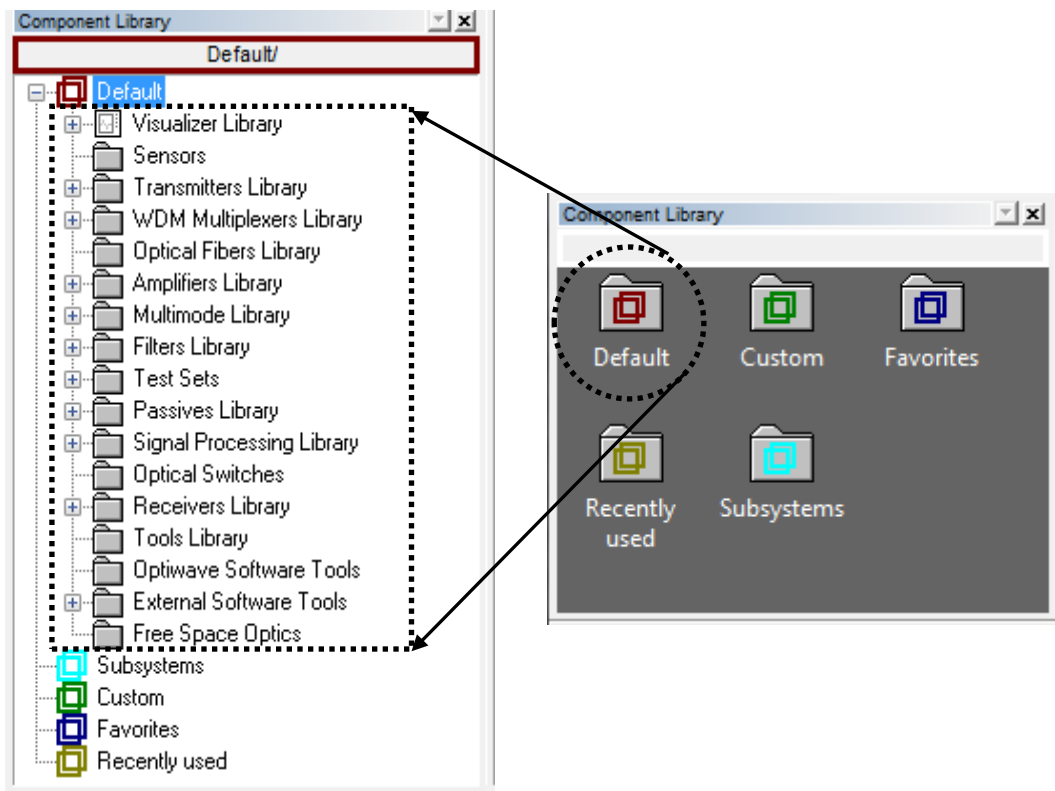


Рисунок 3.2 – Структура библиотеки «Default»



Перед разработкой новой блок-схемы, необходимо создать новый проект выбрав в меню File – New project. В поле №3 главного интерфейса появится основная рабочая область (рисунок 3.3) на которой разрабатывается блок-схема.

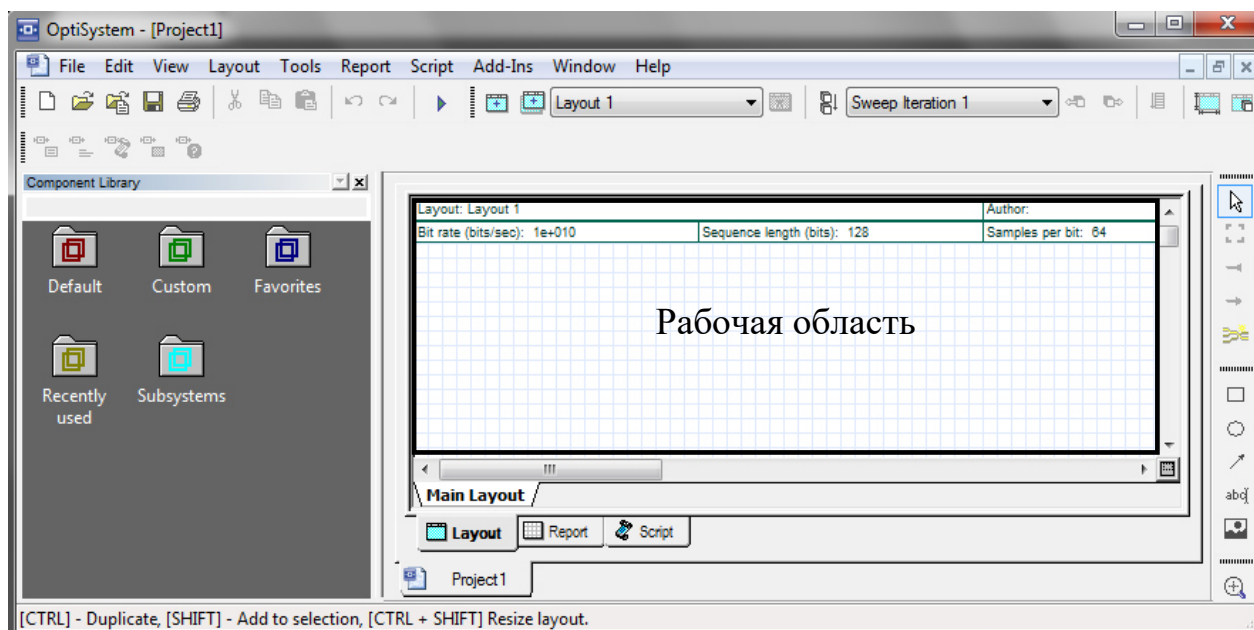


Рисунок 3.3 – Рабочая область с разливкой интерфейс программы OptiSystem для разработки блок-схем

Блок-схема разрабатывается на основе элементной базы (компонентов) библиотеки «Default». Для разработки блок-схем необходимо перейти в нужный пункт меню, например, «Default/WDM Multiplexers Lidrary/Multiplexers/», и правой кнопкой мыши перетащить нужный элемент на рабочую область, как показано на рисунке 3.4. После перемещения элемента, его параметры имеют значение «по умолчанию». Для настройки параметров элемента, следует навести курсор мыши и вызвать контекстное меню, в котором выбирается свойство элемента «Component Properties», как показано на рисунке 3.5.

После разработки схемы и настройки компонентов под нужные задачи, выполняется математический расчет (моделирование) рассматриваемой ситуации. Для этого в главном меню программы, правой кнопкой мыши нажимается кнопка

«Пуск», после чего открывается окно с возможностью выбора сценария моделирования (по умолчанию установлен сценарий расчета всего проекта «Calculate the whole process») и запуска процесса моделирования. Схема запуска моделирования в САПР OptiSystem представлен на рисунке 3.6.

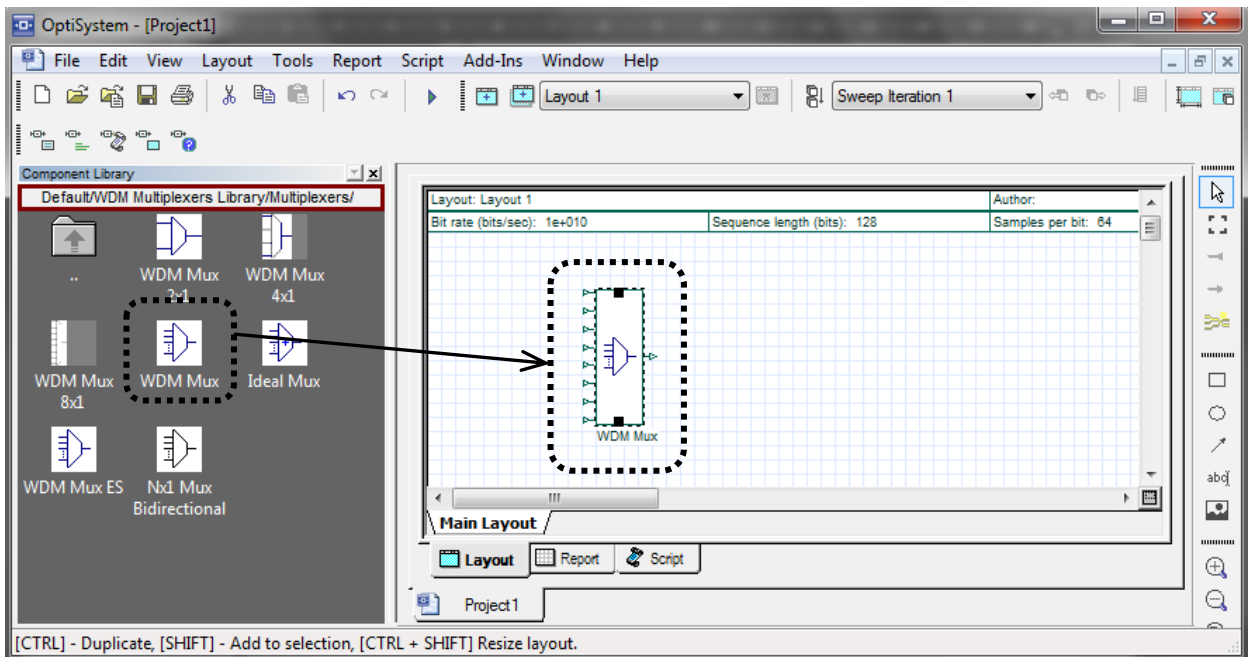


Рисунок 3.4 – Перемещение элемента из библиотеки «Default» на рабочую область

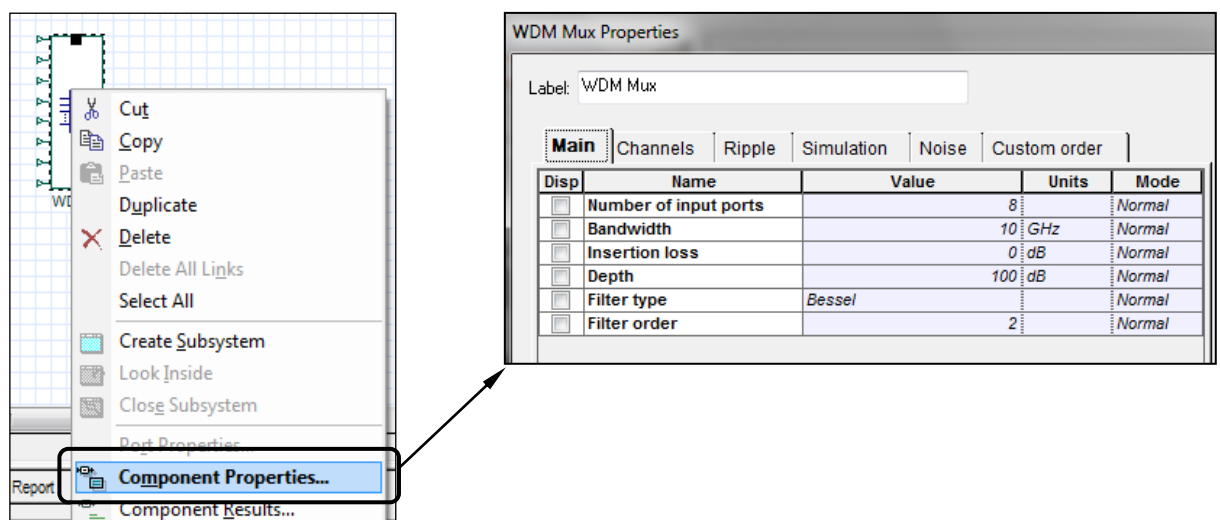


Рисунок 3.5 – Настройки параметров элемента из библиотеки «Default»

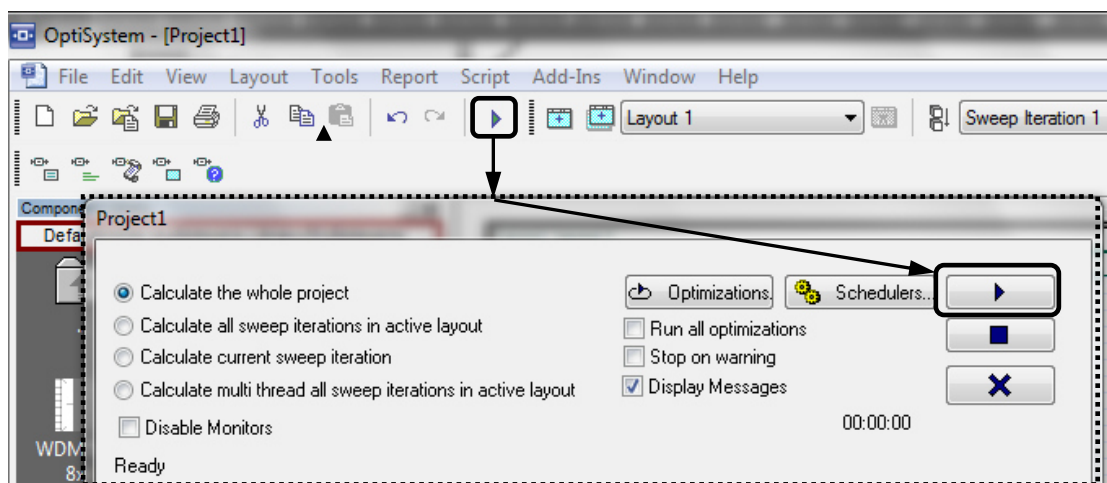


Рисунок 3.6 – Схема запуска моделирования в САПР OptiSystem

### 3.3 Разработка блок-схем резервирования оптических каналов WDM

#### 3.3.1 Разработка первой версии блок-схемы резервирования оптического канала WDM.

Для моделирования схемы, представленной на рисунке 2.1, в САПР OptiSystem будут задействованы следующие компоненты.

Четыре источника оптического излучения (лазерных диода), которые будут моделировать управляемые лазеры типа VCSEL. Настройка основных параметров будет выполняться в ручном режиме. Для этого, в свойствах данного элемента задается длина волны (частота оптического излучения), битовая скорость, тип модуляции, мощность оптического излучения, остальные параметры остаются без изменений. Для каждого из четырех источников оптического излучения, длина волны задается согласно частотному плану, так первый оптический канал будет задействовать длину волны 1552,52 нм (193,1 ТГц), второй канал – 1550,91 нм (193,3 ТГц), третий канал – 1551,72 нм (193,2 ТГц) и четвертый канал – 1550,11 нм (193,4 ТГц). По умолчанию, битовая скорость составляет 10 Гбит/с, тип модуляции интенсивности света – NRZ (Non Return to Zero – линейный код без возвращения к нулю). Мощность оптического излучения задается равной 0 дБм, как средняя

мощность лазерного диода, которая может составлять от минус 5 дБм до плюс 5 дБм. На рисунке 3.7 представлен интерфейс настройки основных параметров источника оптического излучения (ИОИ).

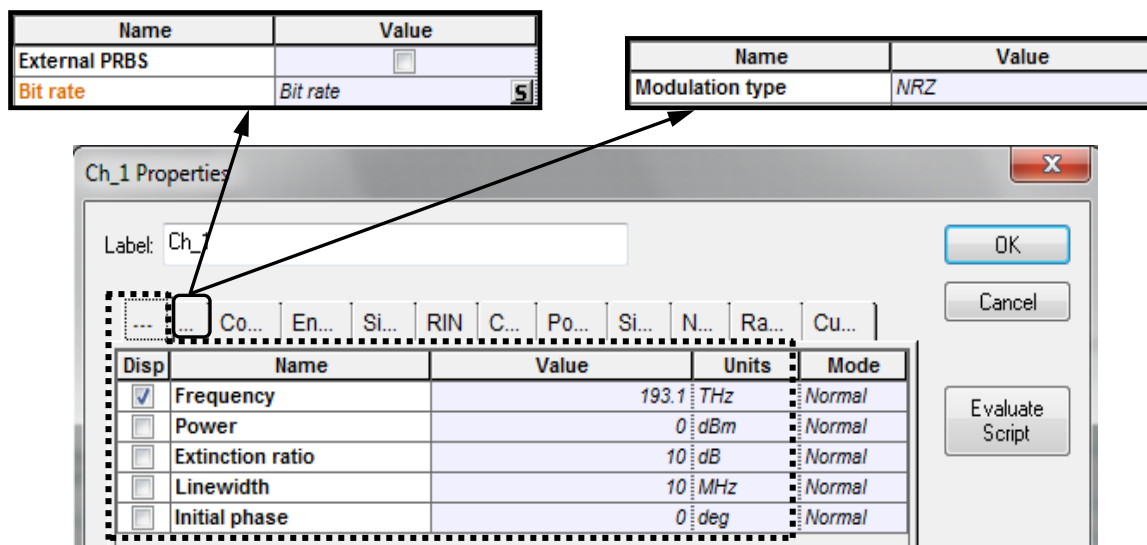


Рисунок 3.7 – Интерфейс настройки параметров ИОИ

Четыре линейных поляризатора света, которые предназначены для поляризации светового оптического излучения генерируемого лазерным диодом. Для нечетных каналов (первый и третий), значение поляризации будет составлять ноль градусов, что соответствует горизонтальной поляризации, для четных каналов (второй и четвертый), значение поляризации будет составлять девяносто градусов, что соответствует вертикальной поляризации. В свойствах поляризатора задается угол линейной поляризации, интерфейс меню представлен на рисунке 3.8.

Четыре приемника оптического излучения (фотодиода), которые выполняют функцию преобразования оптического сигнала в электрический, функцию регенерации электрического сигнала по схеме 3R (усиление, восстановление формы сигнала и ресинхронизация). В качестве фотодиода будут применены PIN-фотодиоды, поскольку данный тип фотоприемников вносит меньше собственных шумов, а его значение энергетического параметра как чувствительность, совместно с мощностью лазерного диода, позволяет перекрыть

дальность связи до 80 км. В свойствах данного элемента настраиваются четыре основных параметра, таких как тип фотодиода, значение темнового тока, который отвечает за величину собственных шумов, тип полупроводникового материала, в частности применен InGaAs (индий арсенид галлия), и настраивается минимальная чувствительность фотодиода. На рисунке 3.9 представлен интерфейс настройки основных параметров фотодиода.

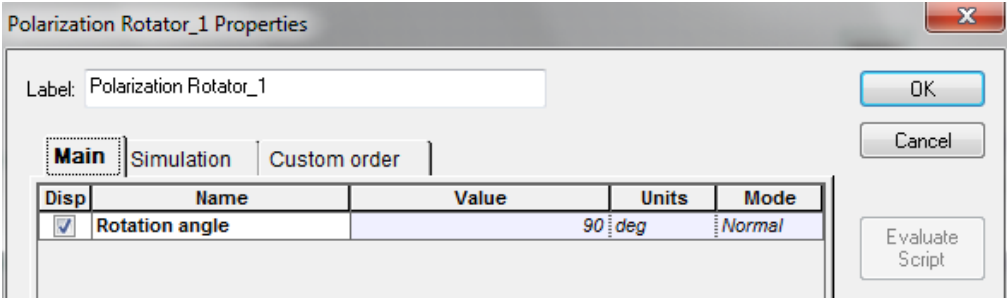


Рисунок 3.8 – Интерфейс настройки поляризатора

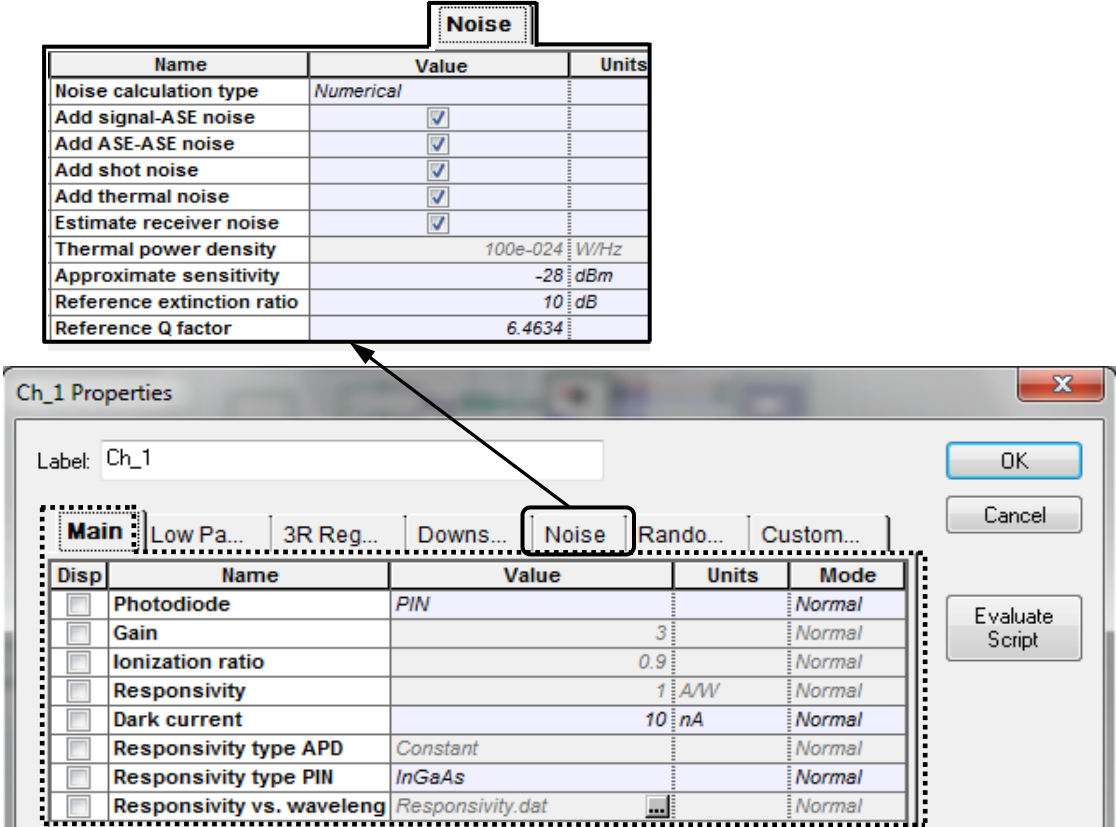
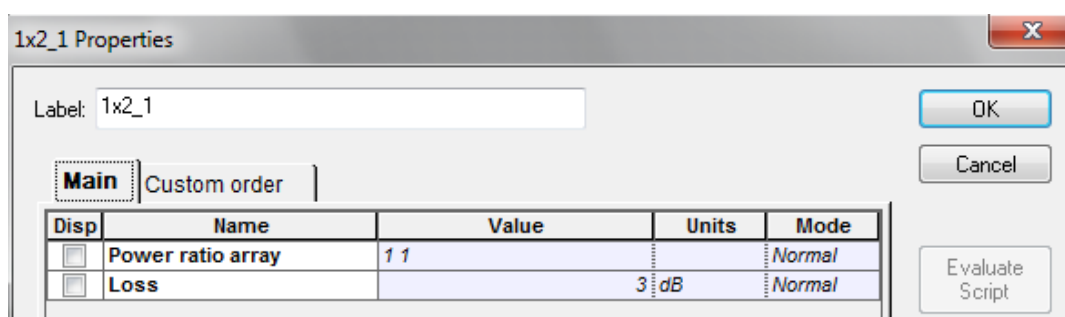
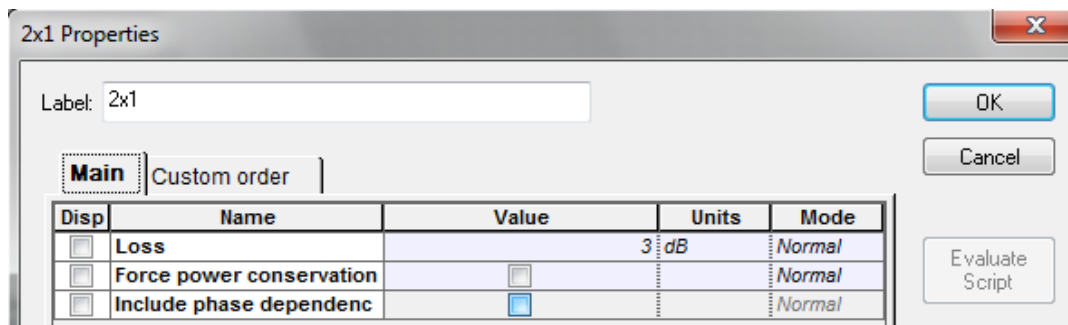


Рисунок 3.9 – Интерфейс настройки основных параметров фотодиода

Для разветвления (разделения) оптического сигнала, согласно схеме представленной на рисунке 2.9, требуется задействовать оптические разветвители типа 1×2 и оптические объединители типа 2×1. В свойствах этих пассивных элементах задается единственный параметр – оптические потери, значение которых составляет 3 дБ, что не превышает величину максимально вносимых потерь оптического разветвителя PLC, которая составляет 4 дБ. Интерфейс настройки параметров оптического разветвителя и объединителя представлен на рисунке 3.10.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Интерфейс настройки параметров оптического разветвителя (а) и объединителя (б)

Два мультиплексора и демультиплексора WDM, с шагом мультиплексирования 100 ГГц, вносимыми оптическими потерями 3 дБ и переходным затуханием между каналами в 40 дБ. Основными настраиваемыми параметрами являются: число мультиплексируемых/демультиплексируемых

оптических каналов, вносимые потери, шаг мультиплексирования, тип фильтра, значение длин волн. Интерфейс настройки параметров мультиплексора и демультиплексора представлен на рисунке 3.11.

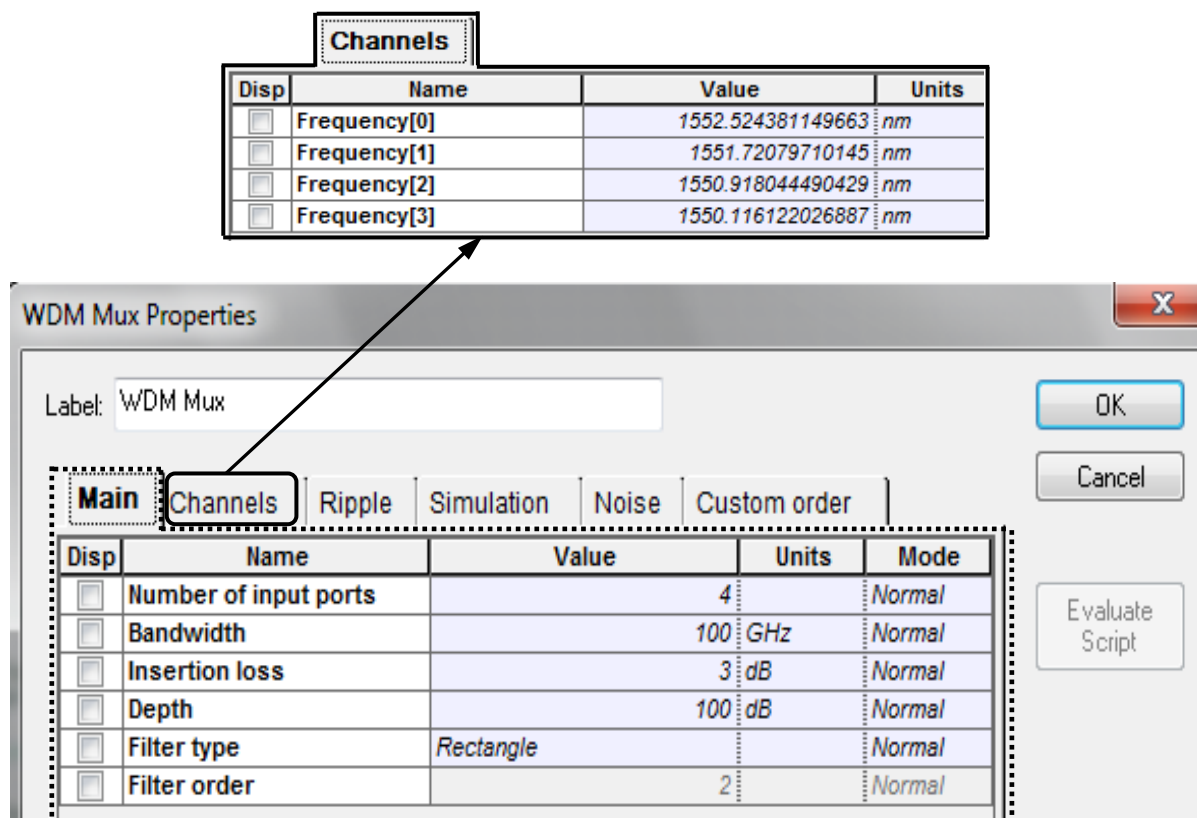


Рисунок 3.11 – Интерфейс настройки параметров мультиплексора и демультиплексора

Оптическое волокно, имитирующее оптическую линию связи протяженностью 80 км. Стандарт оптического волокна рекомендации ITU-T G.652 с километрическим затуханием 0,2 дБ/км и дисперсионным хроматическим параметром 18 пс/нм/км. В свойствах компонента настраивается только один единственный параметр – длина волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Остальные параметры остаются без изменений, поскольку целью данной работы является оценка применимости новых методов резервирования каналов WDM, а не исследования влияния параметров ВОЛС на качество связи. На рисунке 3.12 представлен интерфейс настройки параметров ВОЛС.

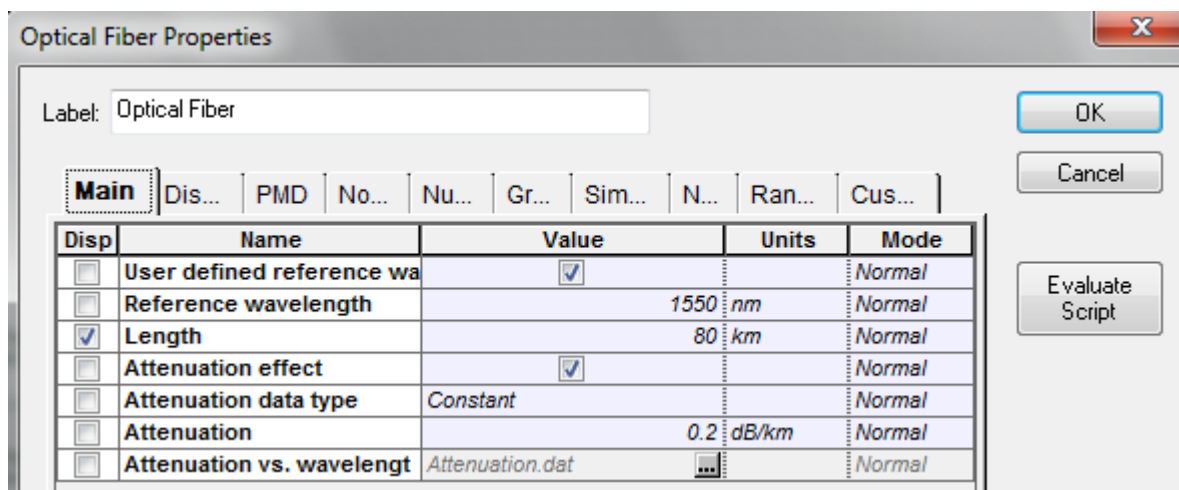


Рисунок 3.12 – Интерфейс настройки параметров ВОЛС

Для разделения поляризованных оптических сигналов на приеме, требуется задействовать поляризационный сплиттер. Данный компонент, как пассивное устройство, вносит оптические потери, величина которых не превышает 3 дБ. В настройках поляризационного сплиттера задается один единственный параметр – угол поляризации, который по умолчанию составляет ноль градусов. Интерфейс настройки поляризационного сплиттера представлен на рисунке 3.13.

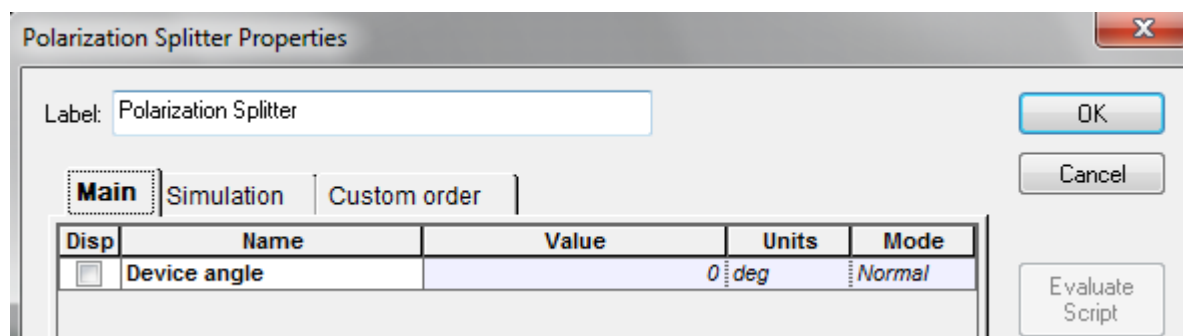


Рисунок 3.13 – Интерфейс настройки поляризационного сплиттера

Как показали первые результаты моделирования, для сети WDM протяженностью 80 км, в которой интегрированы дополнительные пассивные компоненты, такие как оптический разветвитель, объединитель и



поляризационный сплиттер, не достигается требуемого коэффициента ошибок. Для достижения требуемого коэффициента ошибок требуется установка оптического предусилителя, который будет компенсировать оптические потери пассивных компонентов. Так в качестве предусилителя будет применены оптические усилители EDFA. Основные параметры EDFA усилителя остаются без изменения. На рисунке 3.14 представлен интерфейс настройки параметров усилителя EDFA.

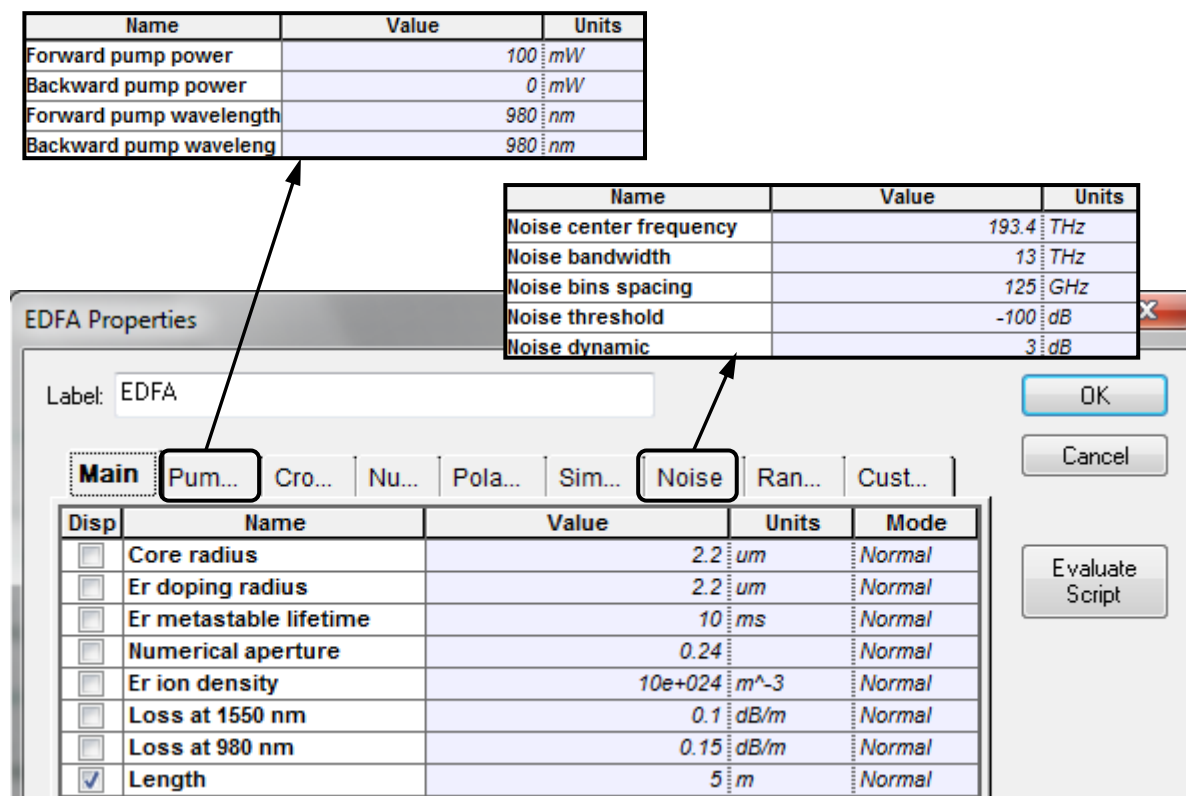


Рисунок 3.14 – Интерфейс настройки параметров усилителя EDFA

Блок-схема резервирования оптических каналов (маршрутов) с применением пассивных компонентов (оптических разветвителей, объединителей и поляризационных сплиттеров), разработанная в среде САПР OptiSystem, представлена на рисунке 3.15. Для анализа работоспособности схемы резервирования оптических каналов первой версии, задействованы измерительные инструменты:

- анализатор WDM сигнала (WDM Analyzer);

- анализатор «глаз-диаграммы» (Eye Diagram Analyzer)

В анализаторе WDM сигнала результаты измерений отображаются в виде численных значений параметров оптических WDM канала, таких как мощность оптического канала, длина волны (частота) оптического канала, уровень шума, отношение сигнала/шум (SNR – Signal to Noise Ratio), В анализаторе «глаз-диаграммы» результаты измерений показываются в виде численных и графических значений. К численным показателям относится коэффициент ошибок и Q-фактор, к графическим значениям относят «глаз-диаграммы» и Q-фактор.

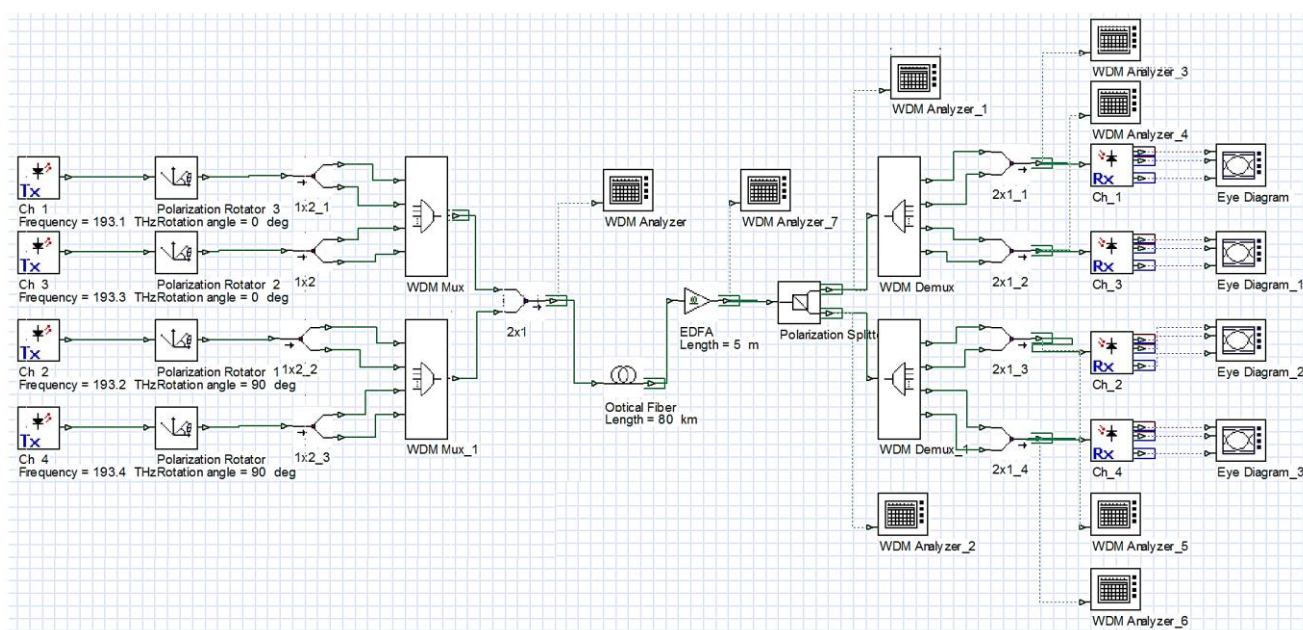


Рисунок 3.15 – Блок-схема резервирования оптических каналов для первой версии

### 3.3.2 Результаты моделирования первой версии схемы резервирования оптических каналов WDM.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.16. Значения коэффициента ошибок для оптических каналов составляет:

- первый канал:  $8,4 \times 10^{-6}$ ;
- второй канал:  $2,3 \times 10^{-5}$ ;
- третий канал:  $6,4 \times 10^{-6}$ ;

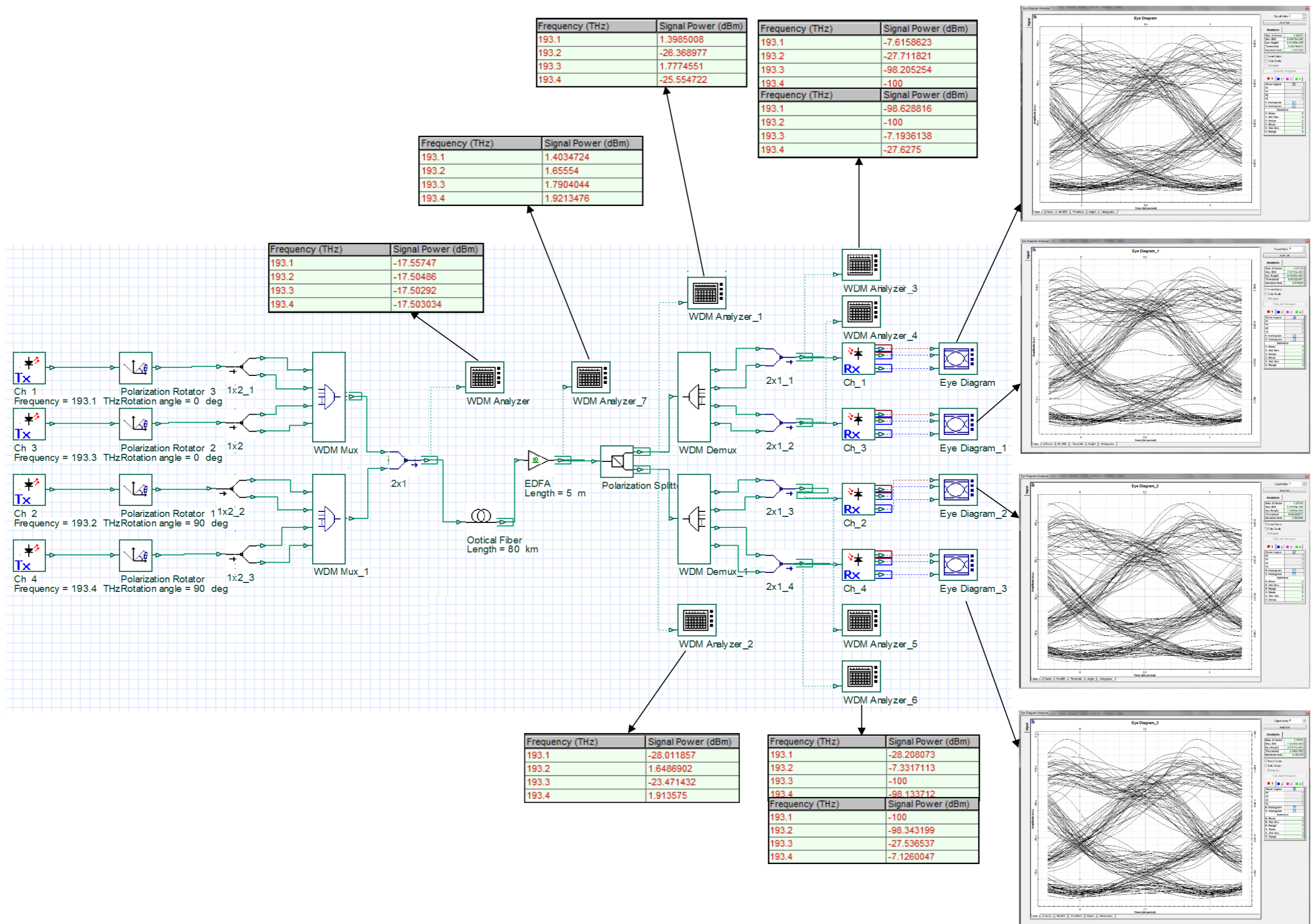


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования резервирования оптических каналов для первой версии

- четвертый канал:  $7,3 \times 10^{-5}$ .

Рекомендуемый коэффициент ошибок для ВОЛС протяженностью 80 км рассчитывается по формуле:

$$K_{ошL_x} = K_{ош1км} \times L_x, \quad (3.1)$$

где  $K_{ошL_x}$  – рассчитываемый коэффициент ошибок для ВОЛС с протяженностью секции мультиплексирования  $L_x$ ;

$K_{ош1км}$  – нормируемый коэффициент ошибок на 1 км линии связи;

$L_x$  – длина секции мультиплексирования (регенерирования).

Коэффициент ошибок на 1 км линии связи рассчитывается исходя из нормы коэффициента ошибок на магистраль протяженностью 10000 км, которая составляет  $10^{-6}$ . Тогда  $K_{ош 1 км} = 10^{-10}$ , а для 80 км составит:

$$K_{ош80км} = 10^{-10} \times 80 = 8 \times 10^{-9}$$

Полученные результаты моделирования в 1000 раз больше чем рассчитанное аналитическое значение коэффициента ошибок для линии протяженностью 80 км. Во-первых, обусловлено это систематической ошибкой на программном уровне, поскольку в процессе моделирования коэффициент ошибок не зависит от времени тестирования, от алгоритма обработки принимаемого сигнала, а зависит от количества итераций (выборок), которые сказываются на времени расчета. Как правило, количество выборок берется таким, чтобы произвести оценку какого-либо параметра при оптимальных параметрах системы. Как показывали промежуточные результаты моделирования, коэффициент ошибок варьировался от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ . Во-вторых, обусловлено это переходными процессами между смежными оптическими каналами на приеме, так, для первого оптического канала, на входе фотодиода наблюдаются спектральные составляющие смежного канала, уровень которых отличается на 20 дБм, что сказывается на приросте

коэффициента ошибок. Основная причина переходных процессов между оптическими каналами – это не совершенствование параметра оптических компонентов (оптический мультиплексор/демультиплексор, поляризационный сплиттер), такого как переходное затухание. Чем больше значение переходного затухания, тем меньше влияние смежных каналов. Для компенсации переходных помех можно применить оптические компоненты (оптический мультиплексор/демультиплексор, поляризационный сплиттер) с большим значением переходного затухания для смежных каналов или дополнительно задействовать бустер или уменьшить длину секции мультиплексирования, например, до 70 км, что даст прирост в переходном затухании 2 дБ и уменьшению коэффициента ошибок в 1000 раз и составляет  $5,6 \times 10^{-9}$ , результат моделирования представлен на рисунке 3.17.

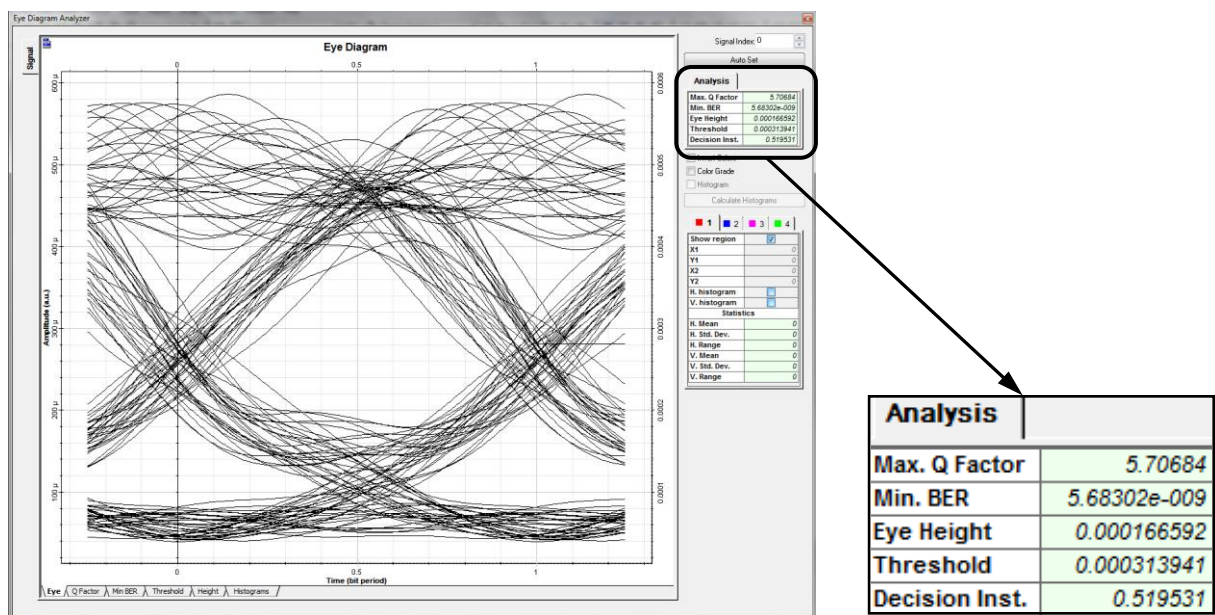


Рисунок 3.17 – Результат моделирования первой версии схемы резервирования оптического канала для секции мультиплексирования протяженностью 70 км

Основываясь на положительных результатах моделирования схемы резервирования оптического канала первой версии (рисунок 2.9), можно говорить о том, что данный вариант резервирования можно применить на практике как на

вновь строящихся сетях, так и на существующих объектах связи, для этого достаточно интегрировать в действующее оборудование оптические разветвители/объединители, поляризаторы, поляризационный сплиттер и передающие модули с перестраиваемым лазером.

### 3.3.3 Разработка второй версии блок-схемы резервирования оптического канала WDM

Во второй версии схемы резервирования оптического канала, представленной на рисунке 2.4, в отличие от первой версии, будут задействованы только оптические разветвители и объединители. Блок-схема резервирования оптических каналов для второй версии, разработанной в среде САПР OptiSystem, представлена на рисунке 3.18.

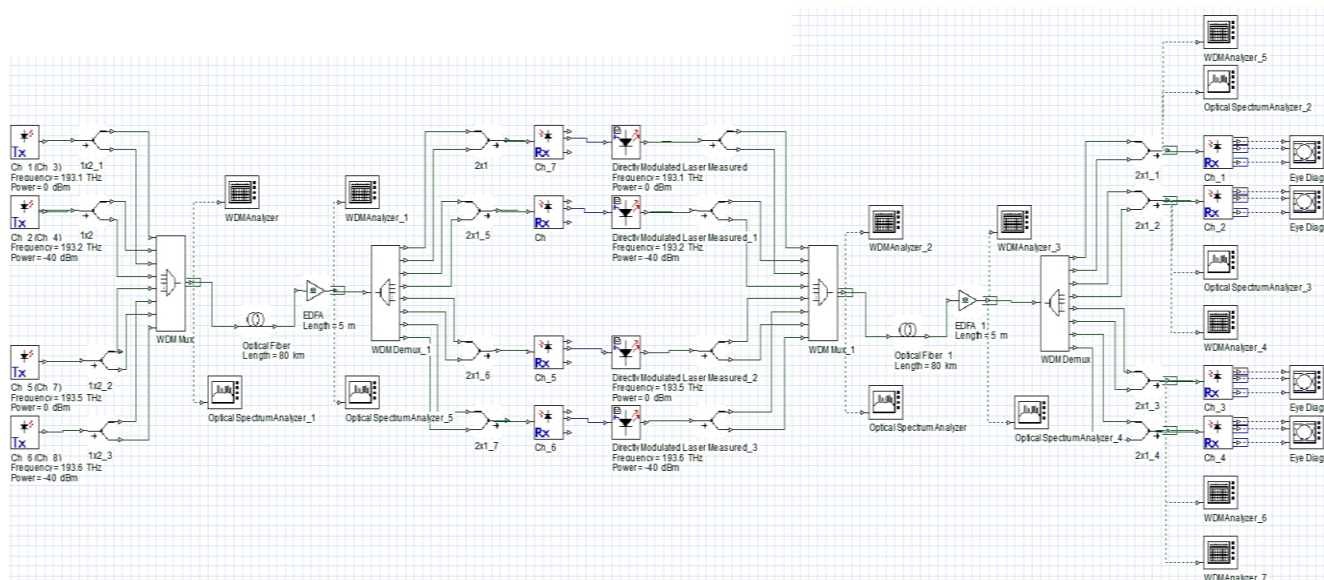


Рисунок 3.18 – Блок-схема резервирования оптических каналов для второй версии

Для анализа работоспособности схемы резервирования оптических каналов WDM задействованы такие измерительные инструменты как:

- анализатор WDM сигнала (WDM Analyzer);
- анализатор «глаз-диаграммы» (Eye Diagram Analyzer)
- анализатор спектра сигнала WDM (Optical Spectrum Analyzer).

В отличие от моделирования первой версии схемы резервирования

оптических каналов, в моделировании резервирования оптических каналов для схемы второй версии рассматривается моделирование промежуточного узла WDM, который может выполнять функцию регенерации, транзита и ввода-вывода оптического канала WDM. Благодаря промежуточному узлу появляется возможность проверки работоспособности резервирования оптического канала при выходе из строя одного из транспондеров.

### 3.3.4 Результаты моделирования второй версии схемы резервирования оптических каналов WDM.

Так, для проверки работоспособности схемы резервирования представленной на рисунке 3.18, рассмотрены два варианта: штатный и резервный. Стоит отметить тот факт, что клиенту предоставляется два физических порта мультиплексора WDM, где первый порт используется для приема и передачи данных, второй является резервным. Передача и прием может выполняться на одном из двух оптических каналов. Таким образом, для одного клиента выделяется четыре оптических канала WDM, где один канал выступает в качестве основного, остальные три используются в качестве резервного канала связи.

Для штатного режима работы схемы, задействованы два оптических канала Ch 1 с частотой 193,1 ТГц и Ch 5 с частотой 193,5 ТГц. Оптические каналы Ch 2, Ch 3, Ch 4, Ch 6, Ch 7 и Ch 8 выступают как резервные каналы связи. Поскольку клиенту предоставляются два физических порта WDM мультиплексора, где второй порт является резервным, то в блок-схеме, представленной на рисунке 3.18, второй резервный порт должен быть не активным (выключенным). Основываясь на выше поставленных условиях, где сказано, что моделирование транспондеров не рассматривается, а само моделирование должно быть простым, моделирование выключенного состояния второго резервного канала (транспондера) выполнено путем задания значения выходной мощности передатчика равной минус 40 дБм. Результаты полученных спектральных значений оптических каналов в штатном режиме представлены на рисунке 3.19.

Результаты качественных показателей оптического канала, к ним относятся коэффициент ошибок и глаз-диаграмма, представлены на рисунке 3.20.

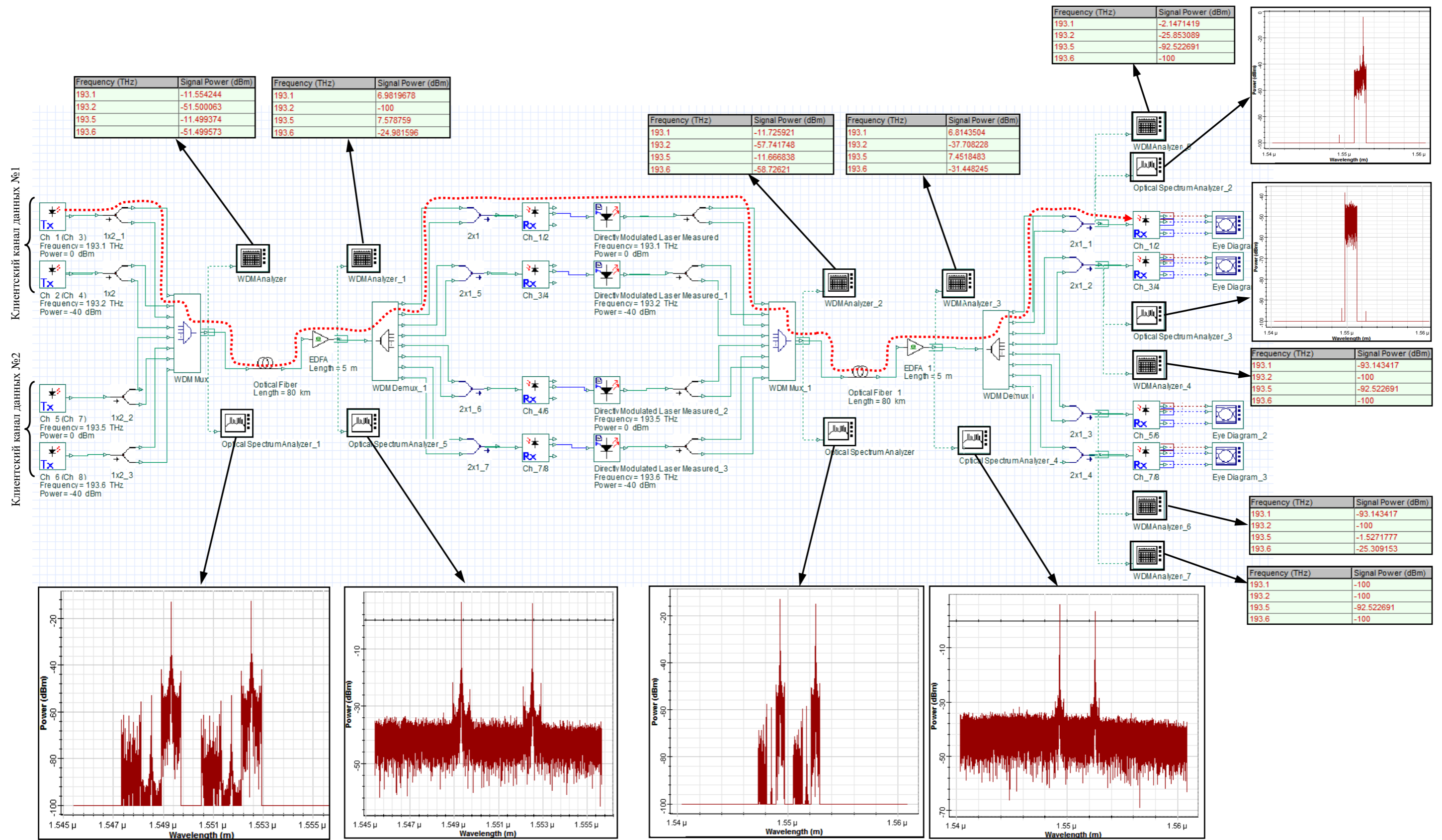
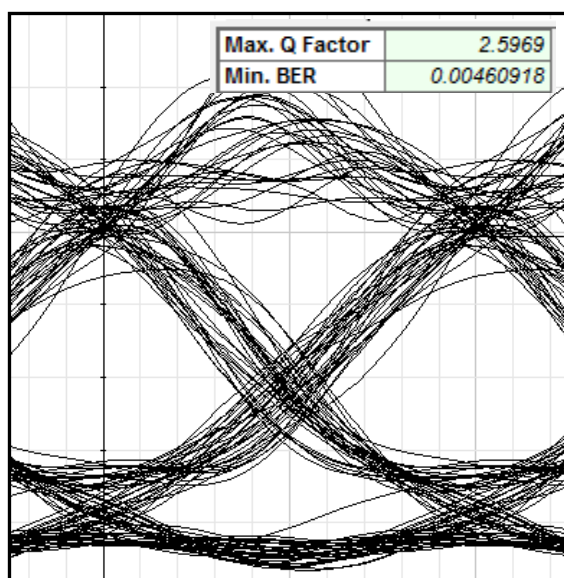


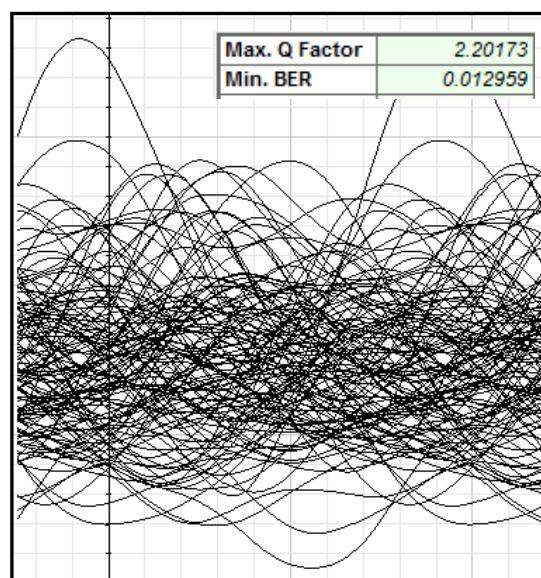
Рисунок 3.19 – Результаты спектральных значений оптических каналов для второй схемы резервирования каналов WDM в штатном режиме



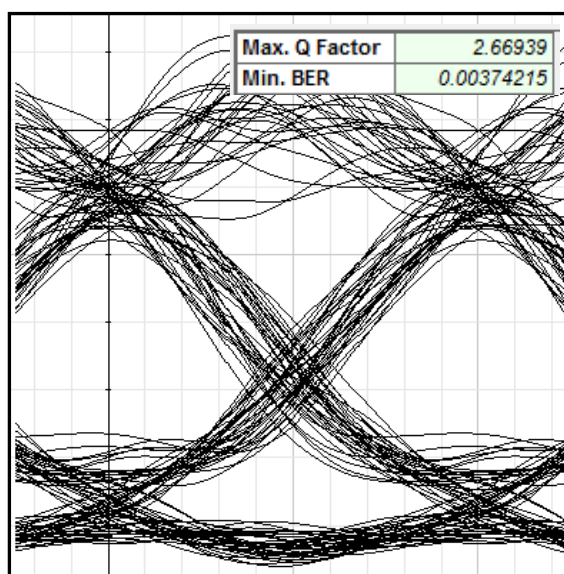
На рисунке 3.20а и 3.20б показаны глаз-диаграммы для первого клиентского канала данных. Глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.20а, относится к рабочему оптическому каналу WDM первого клиентского канала данных, а глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.20б, относится к резервному оптическому каналу WDM первого клиентского канала данных.



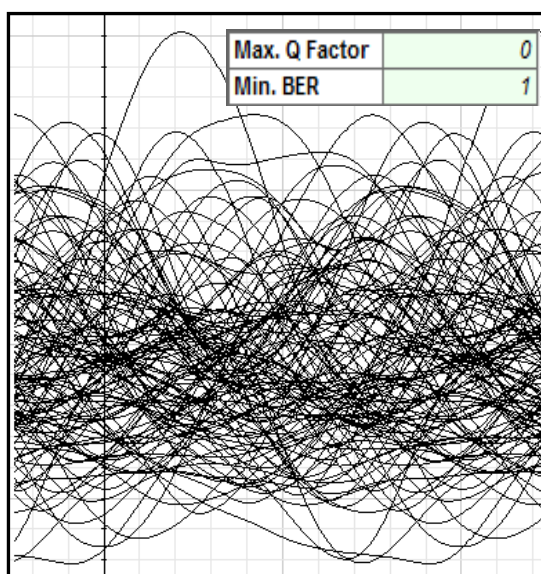
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.20 – Результаты качественных показателей оптического канала при моделировании второй схемы резервирования канала WDM в штатном режиме

На рисунке 3.20в и 3.20г показаны глаз-диаграммы для второго клиентского канала данных. Глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.20в, относится к рабочему оптическому каналу второго клиентского канала данных, а глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.20г, относится к резервному оптическому каналу WDM второго клиентского канала данных. Коэффициент ошибок для первого клиентского канала данных составляет  $4,6 \times 10^{-3}$ , для второго –  $3,7 \times 10^{-3}$ . Полученные результаты моделирования можно считать положительными и несмотря на высокий коэффициент ошибок, характер полученных глаз-диаграммы имеет сходство с глаз-диаграммами, полученными для первой схемы резервирования канала WDM. Для проверки работоспособности второй схемы резервирования канала WDM, смоделируем выход из строя основного приемо-передающего модуля, путем установки значения мощности излучения первого передатчика минус 40 дБ.

Тогда, в автоматическом режиме работы аппаратуры связи произойдет переключение на резервный канал. В данном примере, блок-схема будет работать в режиме резервирования оптического канала WDM для клиентского канала данных №1. Так, на участке между оконечным и промежуточным пунктом (в направлении передачи) произойдет переключение с основного оптического канала Ch 1 работающего на частоте 193,1 ТГц на резервный оптический канал Ch 3 работающего на частоте 193,3 ТГц. В промежуточном узле, резервный приемо-передающий оптический модуль (представляет собой последовательно подключенного фотодиода и лазерного диода) клиентского канала данных №1 перейдет в режим активной работы. Данный блок будет принимать и обрабатывать оптический канал Ch 3 с последующей передачей на частоте резервного оптического канала Ch 2 работающего на частоте 193,2 ТГц. На приемном конце линии связи оптический канал Ch 2 будет демультиплексироваться на первый приемо-передающий оптический модуль клиентского канала данных №1. Второй приемо-передающий оптический модуль на приемном конце будет находиться в режиме резервирования (ожидания). Результаты полученных спектральных значений каналов WDM в режиме резервирования, представлены на рисунке 3.21.

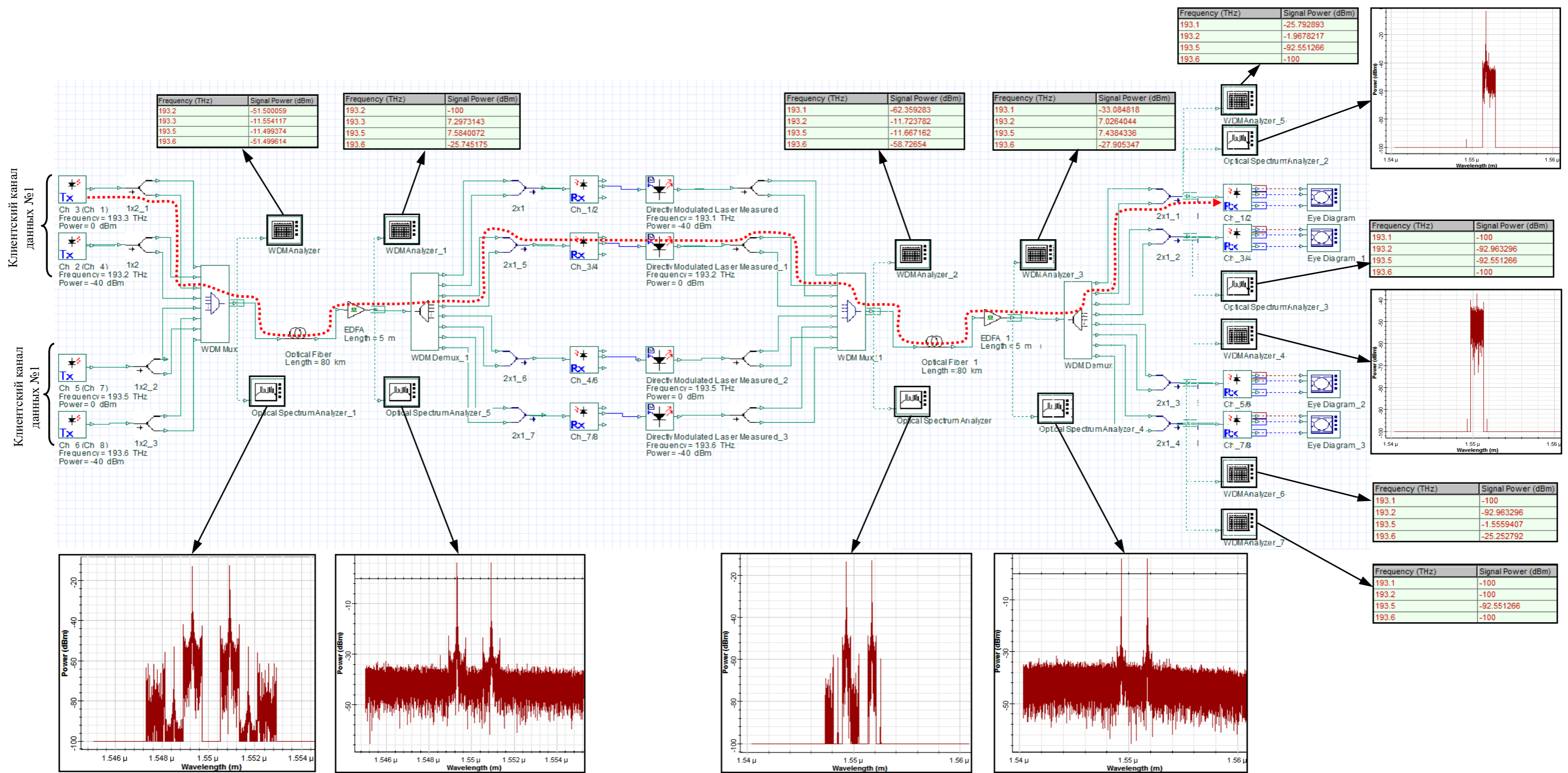


Рисунок 3.21 – Результаты спектральных значений оптических каналов для второй схемы резервирования каналов WDM в режиме резервирования

Результаты качественных показателей оптического канала, а это коэффициент ошибок и глаз-диаграмма, представлены на рисунке 3.22. На рисунке 3.22а и 3.22б показаны глаз-диаграммы для первого клиентского канала данных. На рисунке 3.22в и 3.22г показаны аналогичные глаз-диаграммы, но для второго клиентского канала данных.

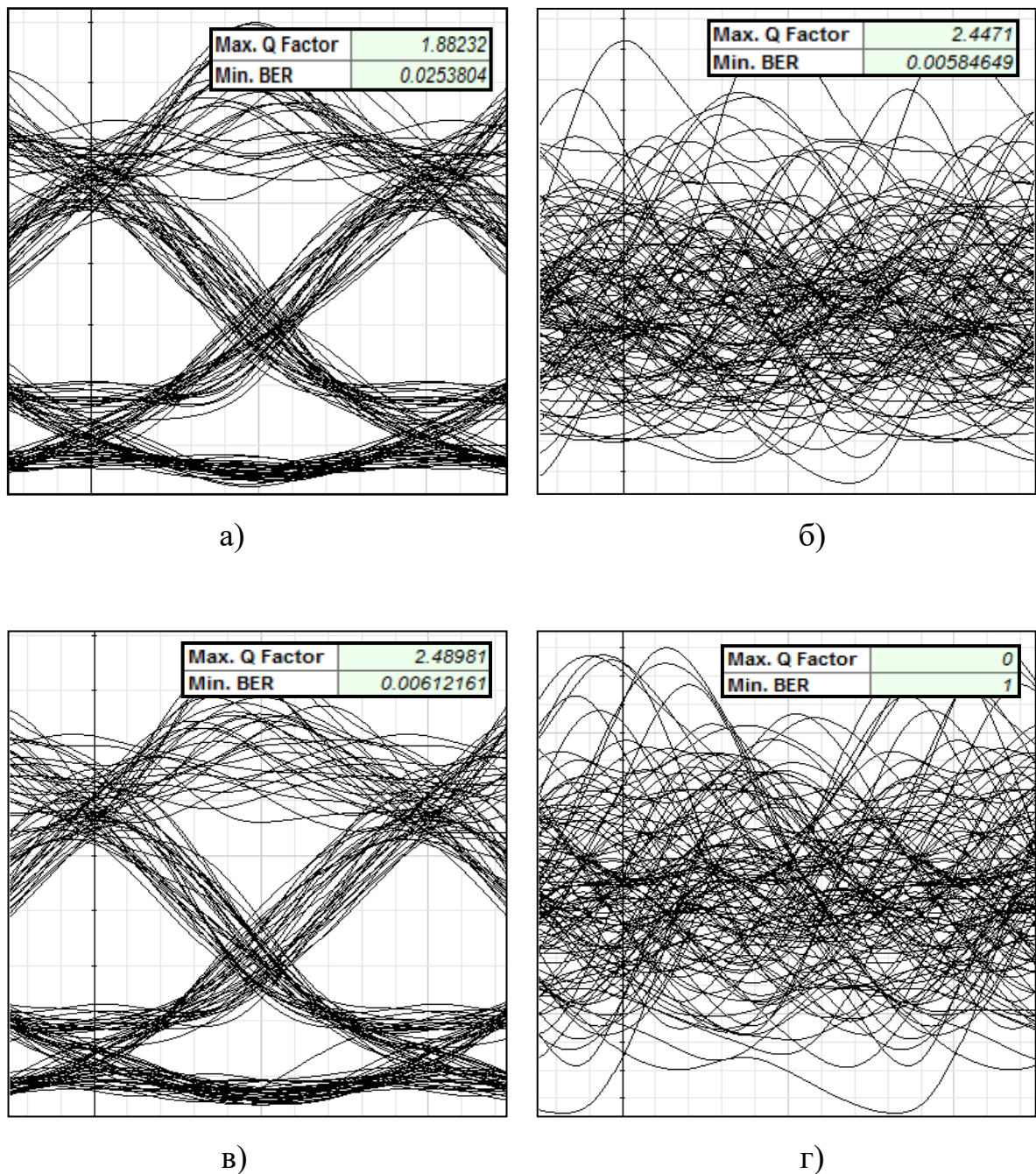


Рисунок 3.22 – Результаты качественных показателей оптического канала при моделировании второй схемы резервирования канала WDM в режиме «резерв»

Глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.22а, относится к рабочему оптическому каналу WDM первого клиентского канала данных, а глаз-диаграмма, представленная на рисунке 3.22б, относится к резервному оптическому каналу WDM первого клиентского канала данных. Коэффициент ошибок как в штатном, так и в резервном режиме работы блок-схемы составил не менее  $10^{-3}$ , что не соответствует нормам. Причиной тому является падение оптической мощности полезного сигнала в пассивных компонентах (оптический объединитель и разветвитель). Применение предусилителя в линии протяжённостью 80 км не позволяет скомпенсировать эти потери. Как и в предыдущем моделировании, при уменьшении длины линии до 70 км ведет к уменьшению коэффициента ошибок, который не превышает  $10^{-9}$ .

Полученные глаз-диаграммы оптических каналов для штатного и резервного режима работы блок-схемы, имеют схожий характер с полученными глаз-диаграммами работы блок-схемы представленной на рисунке 3.16 для первой версии схемы резервирования каналов WDM.

### 3.3.5 Разработка третьей версии схемы резервирования оптических каналов WDM.

С учетом поставленных условий моделирования, блок-схема резервирования оптических каналов WDM для третьей версии представлена на рисунке 3.23.

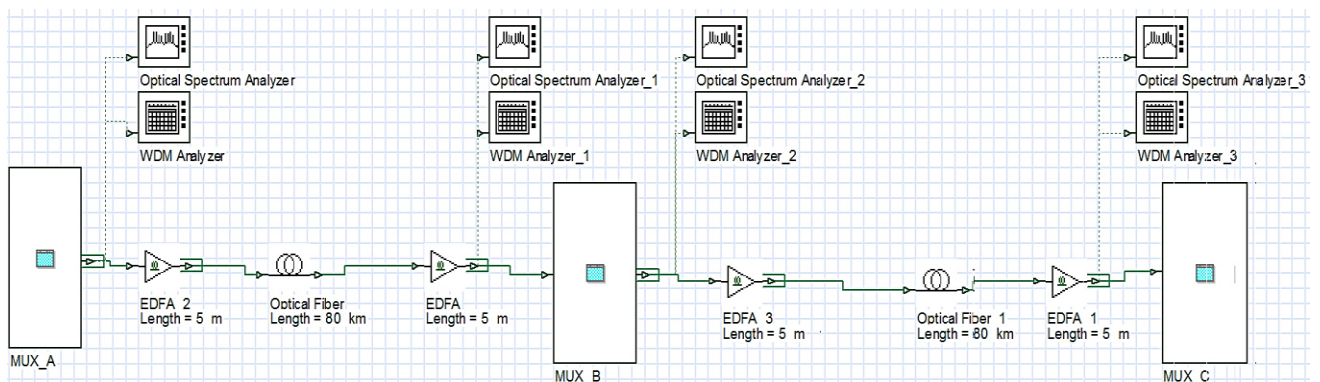


Рисунок 3.23 – Блок-схема резервирования оптических каналов для третьей версии

Отличительной особенностью блок-схемы резервирования оптических каналов для третьей версии от предыдущих, является применение подсхем, которые позволяют уменьшить размеры блок-схемы на рабочем поле. Блок-схема, представленная на рисунке 3.23 имеет три подсхемы, которые представляют собой оконечные (MUX\_A и MUX\_C) и промежуточный (MUX\_B) мультиплексоры. Для создания подсхемы необходимо курсором мыши, при этом удерживая левую клавишу, на рабочем поле выделяются компоненты, которые должны входить в подсхему. После выделения компонентов, правой кнопкой мыши вызываем контекстное меню и выбираем Create Subsystem (создать подсхему), как показана на рисунке 3.24.

На рабочем поле появится подсхема, наведя курсор на которую, правой кнопкой мыши вызывается контекстное меню, где выбирается Component Properties (свойство компонента) для переименования и указания параметров этой подсхемы.

Блок-схема мультиплексора MUX\_A и MUX\_C представлена на рисунке 3.25. Блок-схема промежуточного мультиплексора MUX\_B представлена на рисунке 3.26.

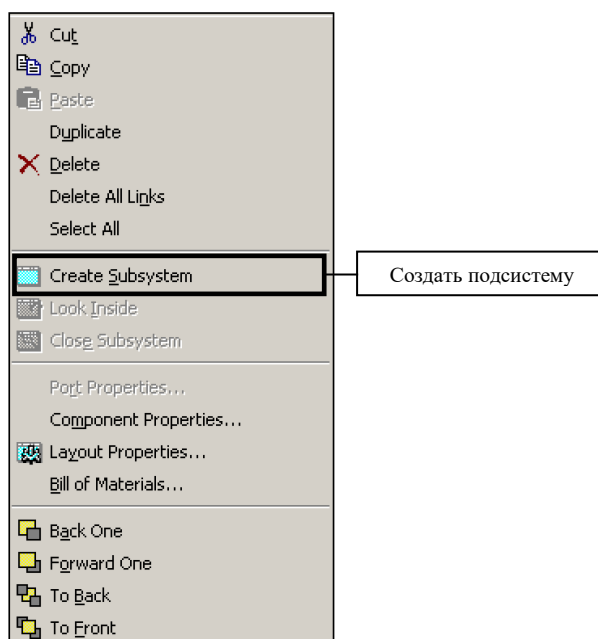
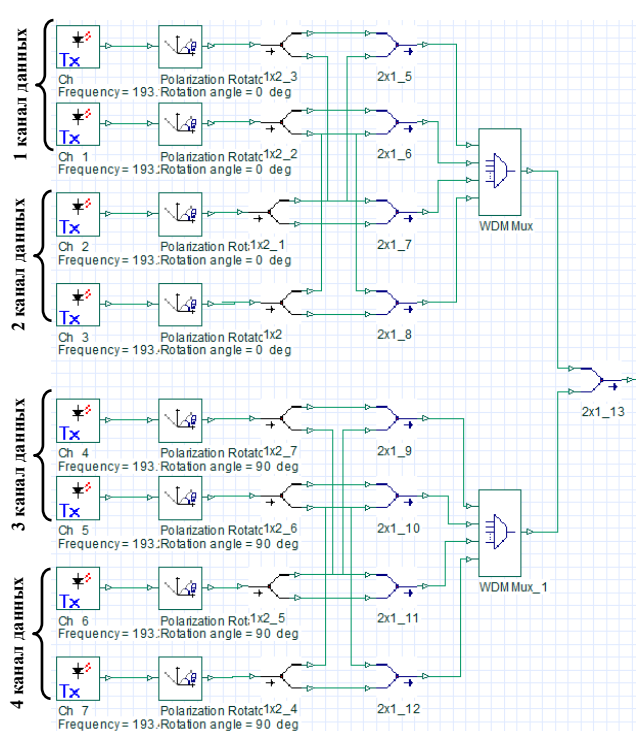
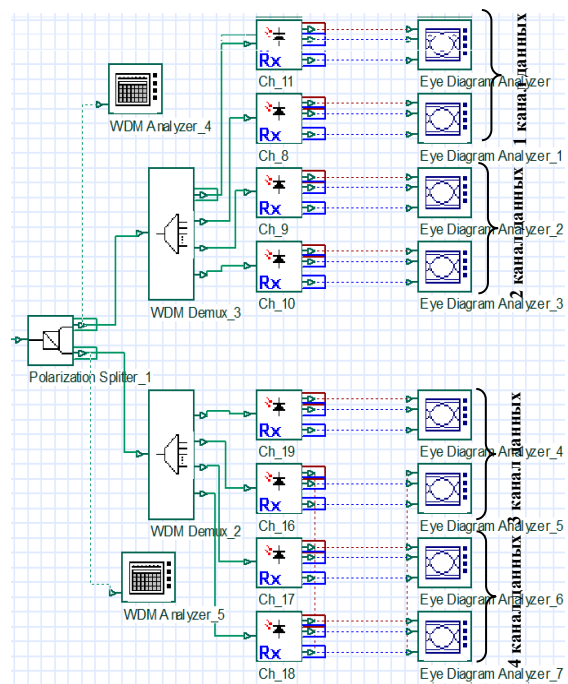


Рисунок 3.24 – Контекстное меню выделенных компонентов



а)



б)

Рисунок 3.25 – Блок-схема мультиплексора: а) MUX\_A; б) MUX\_C

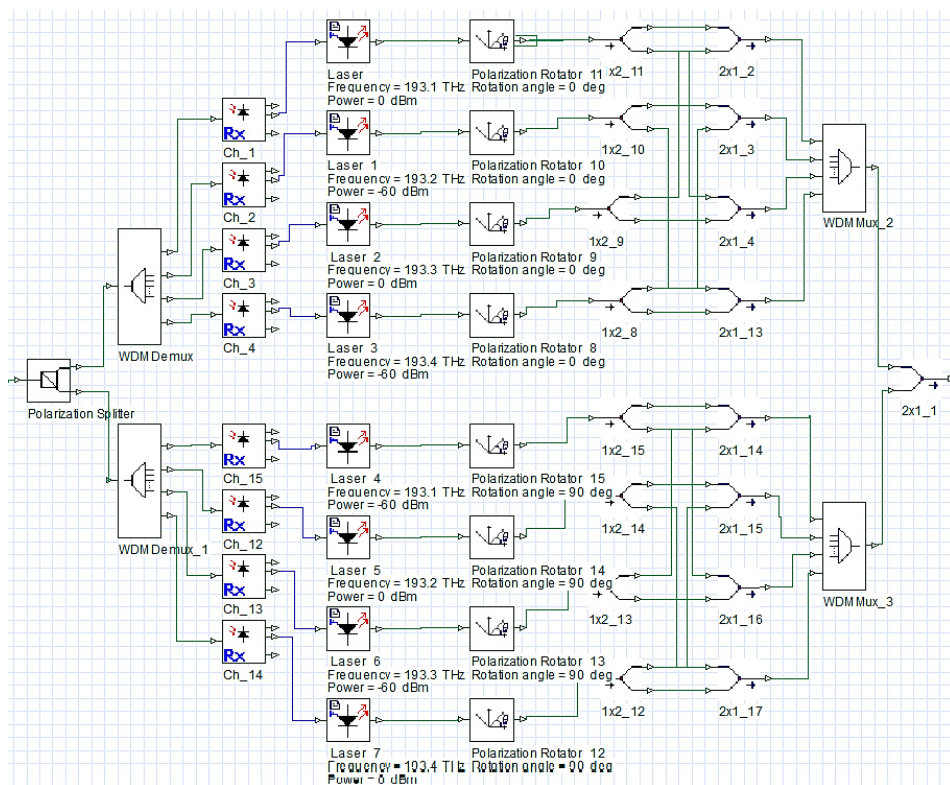


Рисунок 3.26 – Блок-схема мультиплексора MUX\_B

Как показали результаты моделирования резервирования оптических каналов для второй версии, коэффициент ошибок составил не менее  $10^{-3}$ , что не соответствует нормам. Причиной тому является падение оптической мощности полезного сигнала в пассивных компонентах (оптический объединитель и разветвитель). Для компенсации этих потерь принято решение о установке дополнительного усилителя – бустера.

3.3.6 Результаты моделирования третьей версии схемы резервирования оптических каналов WDM.

Результаты моделирования третьей версии схемы резервирования оптических каналов WDM получены в режиме штатной и резервной работы разработанной блок-схемы.

Результат моделирования работы блок-схемы в штатном режиме представлен в виде спектральных значений оптических каналов, как показано на рисунок 3.27. Показанные спектры каналов имеют визуальное отличие. Так, спектр каналов снятый на выходе мультиплексоров MUX\_A и MUX\_B не имеет шумовые процессы за пределами рабочей полосы группового DWDM сигнала, в отличии от спектра, снятого на входе мультиплексора MUX\_B и MUX\_C. Спектры, полученные на входе мультиплексоров, имеют шумовые процессы вне полосы группового DWDM сигнала. Эти шумовые процессы есть не что иное как спонтанный шум оптических усилителей. Однако, этот спонтанный шум никак не сказывается на росте коэффициента ошибок. Применение бустера является целенаправленной необходимостью, поскольку на участке «лазерный диод - бустер» наблюдаются потери в 23,5 дБ. Значение получено как разность уровня сигнала на выходе лазерного диода, которое составляет 0 дБм и уровня сигнала на входе бустера, которое составляет минус 23,5 дБм, согласно значениям, представленных на рисунке 3.27.

На рисунке 3.28 представлены значения глаз-диаграммы и коэффициента ошибок для четырех каналов данных. Слева показаны глаз-диаграммы основных (рабочих) каналов WDM, справа показаны глаз-диаграмму резервных каналов WDM.



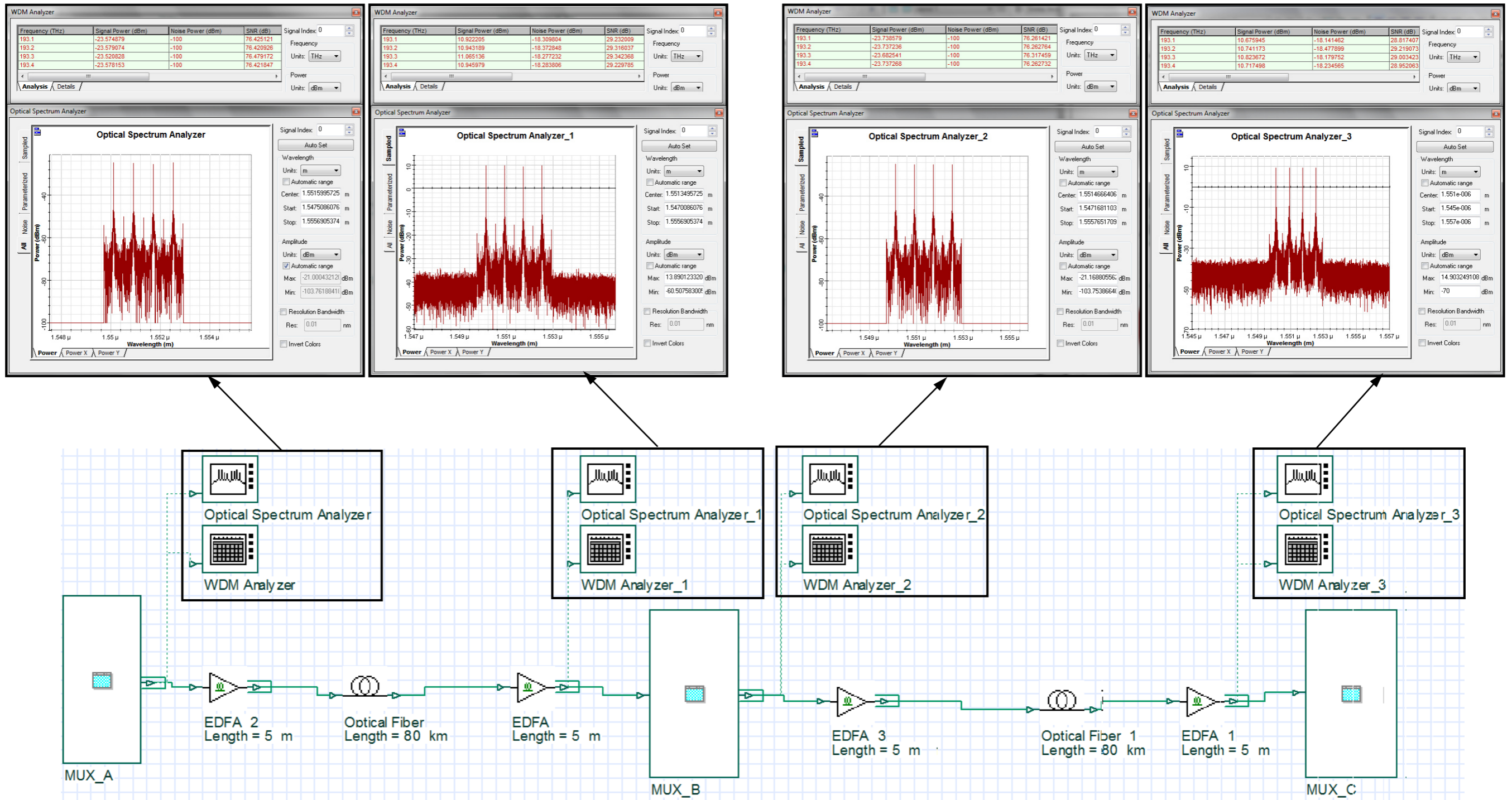


Рисунок 3.27 – Результаты спектральных значений оптических каналов для третьей версии схемы резервирования каналов WDM

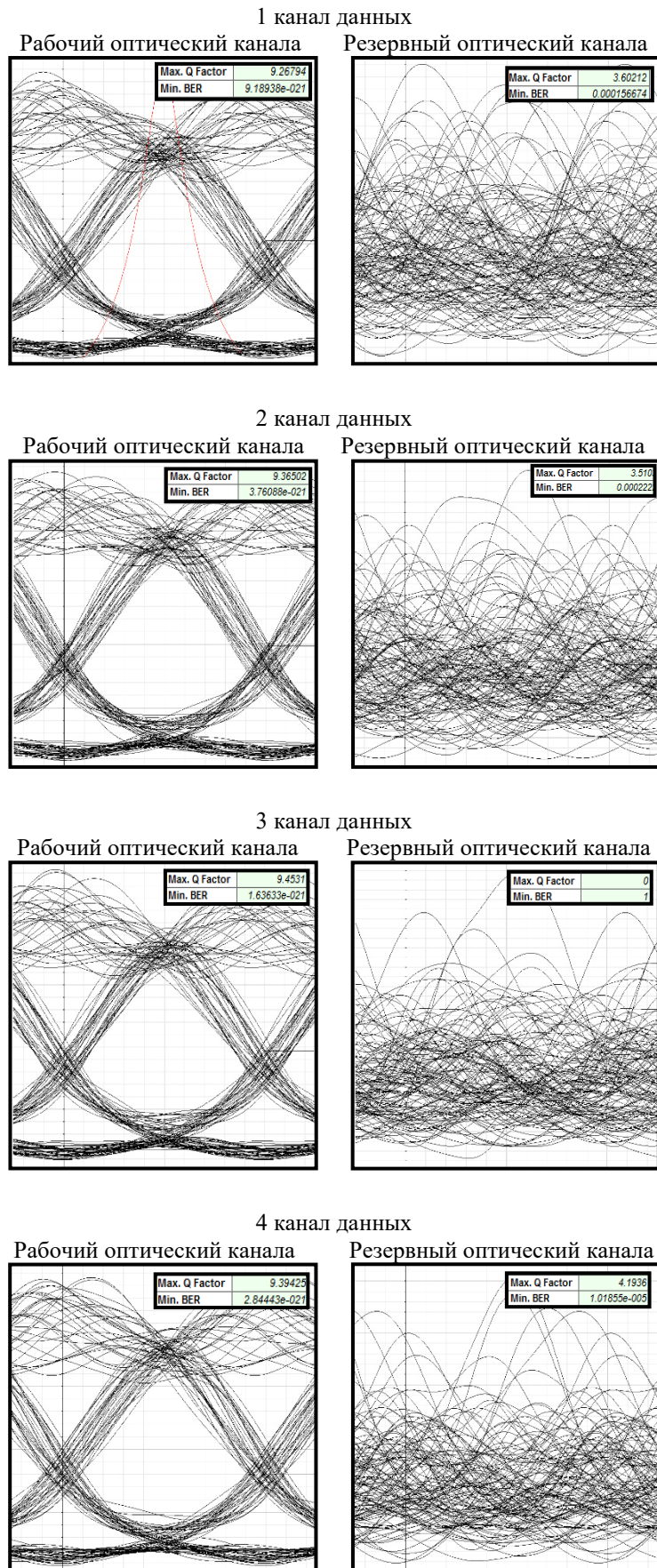
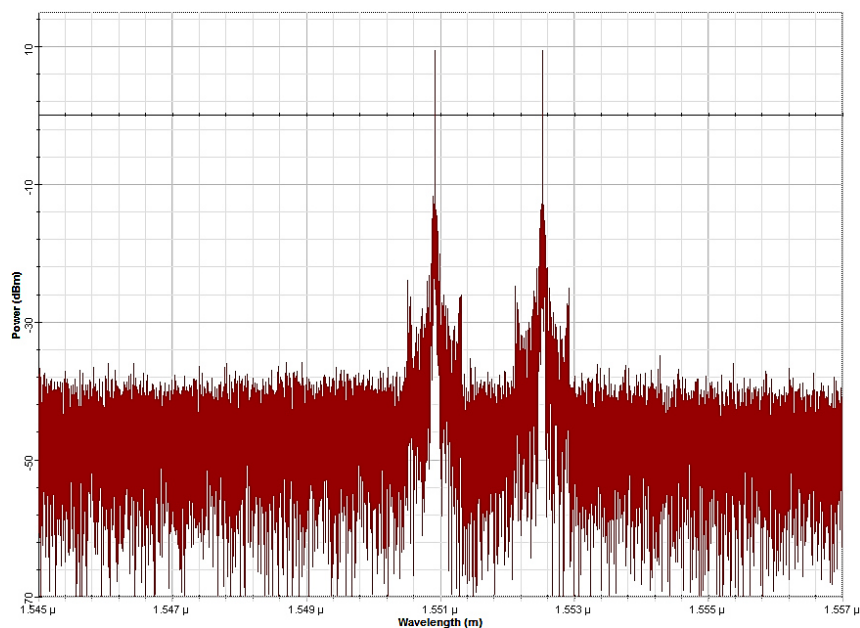
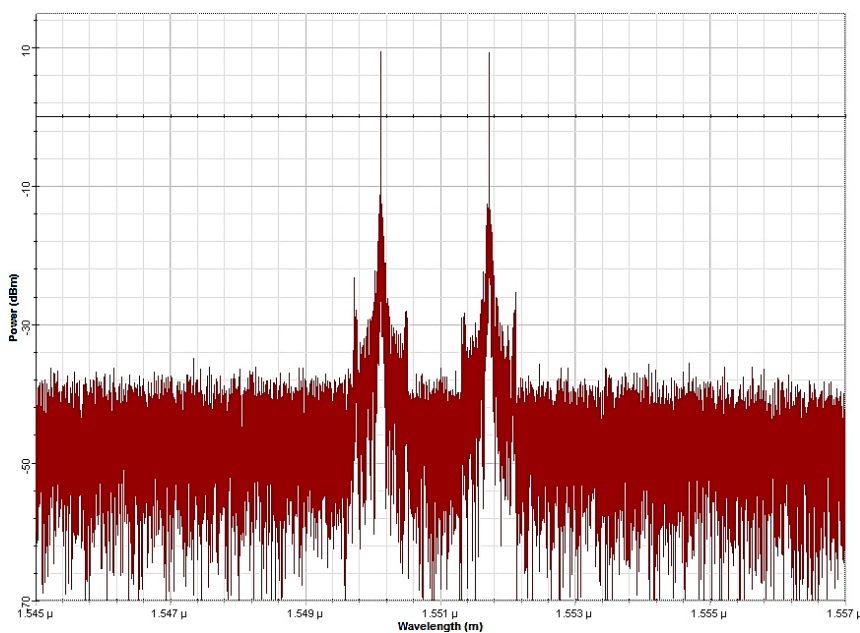


Рисунок 3.28 – Глаз-диаграммы и коэффициент ошибок оптических каналов данных для третьей версии схемы резервирования каналов WDM

Для четырех каналов данных, которые работают на основных оптических каналах 193,1 ТГц и 193,2 ТГц в горизонтальной плоскости поляризации, спектр которых показан на рисунке 3.29а, и для каналов на частотах 193,3 ТГц и 193,4 ТГц в вертикальной плоскости поляризации, спектр которых показан на рисунке 3.29б, коэффициент ошибок составил  $10^{-21}$ , что говорит о работоспособности предложенной схемы резервирования каналов WDM в штатном режиме.



а)



б)

Рисунок 3.29 – Спектры каналов

Для проверки работоспособности схемы в режиме резервирования, смоделируем сбой передачи данных в первом канале данных. Сбой может быть вызван выходом из строя лазерного диода или фотодиода в тракте передачи первого оптического канала или выхода из строя транспондеров первого и второго оптического канала первого канала данных в промежуточном мультиплексоре MUX\_V, как показано на рисунке 3.30. На блок-схеме, перекрестием показаны вышедшие из строя компоненты, сплошной линией показан основной тракт передачи данных первого клиентского канала.

Для моделирования сбоя в тракте передачи первого канала, мощность передатчиков зададим равной минус 60 дБм. В ситуации, когда происходит сбой в работе активных компонентов, выполняется автоматическая реконфигурация системы, а именно:

1) в мультиплексоре MUX\_A активируется резервный второй оптический канала первого канала данных (Power = 0 dBm), частота канала сменится с 193,2 ТГц (частота канала, установленная по умолчанию) на 193,4 ТГц (рисунок 3.30);

2) в мультиплексоре MUX\_V активируется резервный четвертый оптический канала второго канала данных (Power = 0 dBm), частота канала сменится с 193,4 ТГц (частота канала, установленная по умолчанию) на 193,2 ТГц (рисунок 3.30).

На рисунке 3.30 резервный тракт передачи для первого (клиентского) канала данных показан пунктирной линией. Коэффициент ошибок для резервного канала составил  $2,5 \times 10^{-12}$ , что меньше нормативного значения, которое для участка 80 км составляет  $8 \times 10^{-9}$ , согласно представленным расчетам по формуле (3.1). Стоит отметить, что на рисунке 3.30 не показаны оптические усилители, в силу меньшей громоздкости.

Полученные результаты моделирования являются положительными, это говорит о том, что предложенный вариант резервирования оптических каналов WDM, с интеграцией пассивных компонентов в существующую архитектуру мультиплексорного оборудования, является технически реализуемым и позволит повысить надежность как проектируемых, так и действующих сетей DWDM.

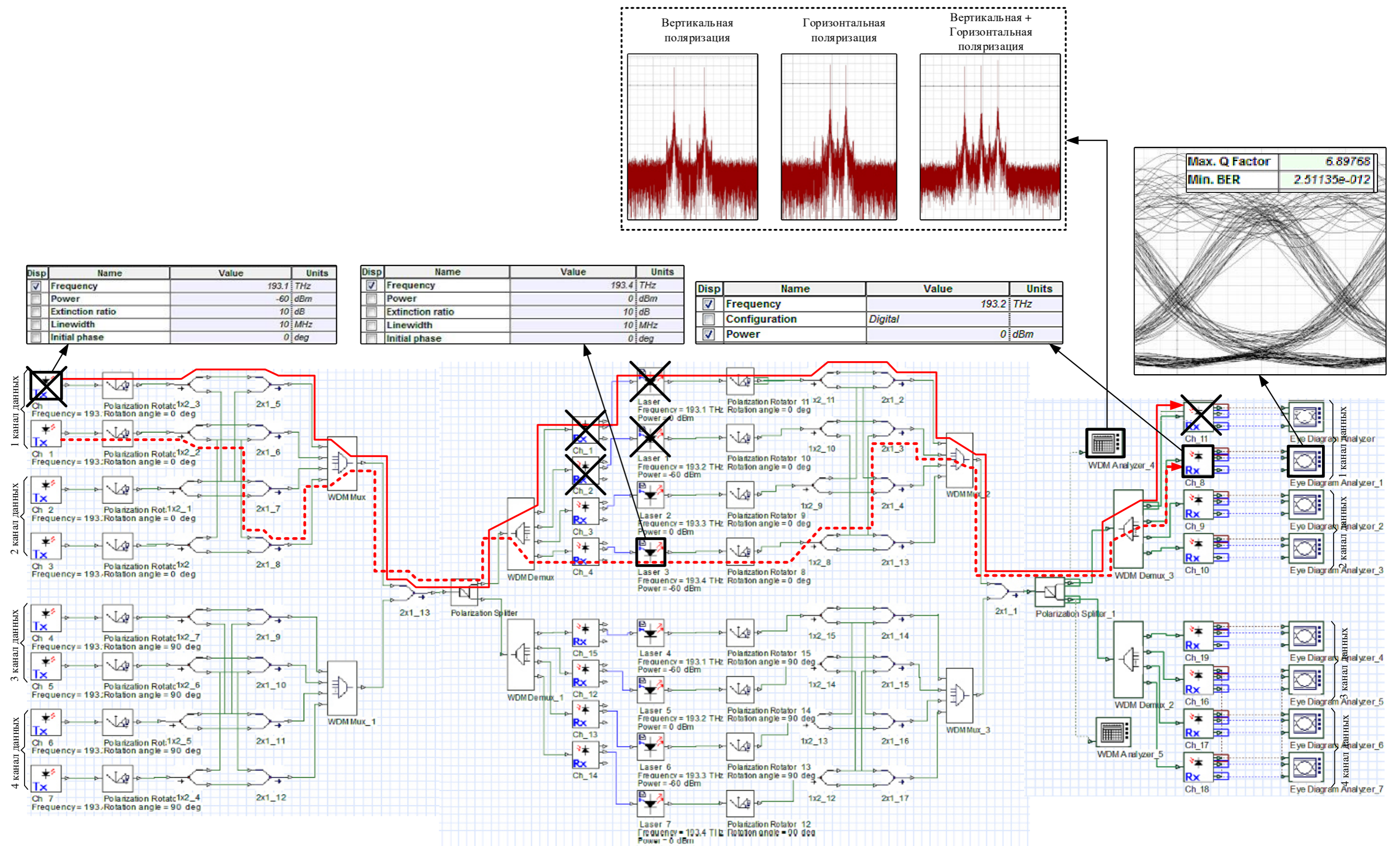


Рисунок 3.30 – Маршруты прохождения основного и резервного тракта передачи данных первого клиентского канала

### 3.4 Выводы

Результаты моделирования показали, что предложенные новые варианты резервирования оптических каналов WDM могут применяться на практике как на действующих, так и на проектируемых сетях WDM. Разработанные схемы решают проблему высокой стоимости оборудования DWDM и не эффективного использования частотного диапазона системы DWDM.

Однако, имеется ряд ограничений и особенностей. Так, в когерентных системах WDM, где применяется модуляция оптической несущей с поляризационным мультиплексированием, например, модуляция типа DP-QPSK (четырёхпозиционная фазовая манипуляция с двойной поляризацией) или DP-32QAM (32 позиционная квадратурная амплитудная манипуляция с двойной поляризацией), применение разработанных схем резервирования, где используются поляризационные фильтры – исключено. При реализации новых схем резервирования каналов WDM требуется применение оптических усилителей (бустера и предусилителя) на линии протяженностью более 70 км, что позволит обеспечить коэффициент ошибок не хуже, чем  $10^{-9}$ .

Кроме этого, интеграция новых схем резервирования в действующих системах связи WDM возможна только в том случае, если в качестве источников оптического излучения в оптических модулях (транспондерах) мультиплексоров WDM применяются перестраиваемые лазерные диоды типа VCSEL, а программное обеспечение мультиплексоров WDM должно иметь возможность инсталляции новых кодов, алгоритмов которых позволят автоматически переключиться на резервный канала и построить новый оптический маршрут при сбоях в рабочем канале связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была достигнута поставленная цель – разработаны новые схемы резервирования оптических каналов и маршрутов в системах WDM, проведена оценка их применимости на практике путем моделирования.

Для достижения поставленной цели был решен ряд задач.

- 1) произведен анализ литературы в области резервирования на сетях WDM;
- 2) рассмотрены основы волнового спектрального мультиплексирования, принцип построения сетей WDM, основные компоненты систем WDM;
- 3) рассмотрены принципы организации резервирования на сетях WDM, рассмотрены достоинства и недостатки применяемых на практике схем резервирования каналов WDM;
- 4) аналитическим методом разработаны новые схемы резервирования оптических каналов WDM, предложено пять вариаций схем резервирования на основе интеграции пассивных компонентов (оптических разветвителей и объединителей, оптических поляризаторов и поляризационных фильтров) в существующую архитектуру мультиплексорного оборудования WDM;
- 5) в системе автоматизированного проектирования (САПР) OptiSystem выполнено моделирование разработанных схем резервирования каналов WDM;
- 6) в САПР OptiSystem разработаны блок-схемы для оценки применимости на практике разработанных схем резервирования каналов WDM;
- 7) на основании полученных результатов моделирования, таких как глаз-диаграмма, коэффициент ошибок, спектр группового сигнала WDM, проведен анализ применимости на практике разработанных схем резервирования каналов WDM.

Результаты исследования показали, что предложенные новые варианты резервирования оптических каналов WDM могут применяться на практике как на действующих, так и на проектируемых сетях WDM. Разработанные схемы решают

проблему высокой стоимости оборудования DWDM и не эффективного использования частотного диапазона системы DWDM. Однако, имеется ряд ограничений и особенностей. Так, в когерентных системах WDM, где применяется модуляция оптической несущей с поляризационным мультиплексированием, например, модуляция типа DP-QPSK (четырёхпозиционная фазовая манипуляция с двойной поляризацией) или DP-32QAM (32 позиционная квадратурная амплитудная манипуляция с двойной поляризацией), применение разработанных схем резервирования, где используются поляризационные фильтры – исключено. При реализации новых схем резервирования каналов WDM требуется применение оптических усилителей (бустера и предусилителя) на линии протяженностью более 70 км, что позволит обеспечить коэффициент ошибок не хуже, чем  $10^{-9}$ . Кроме этого, интеграция новых схем резервирования в действующих системах связи WDM возможна только в том случае, если в качестве источников оптического излучения в оптических модулях (транспондерах) мультиплексоров WDM применяются перестраиваемые лазерные диоды типа VCSEL, а программное обеспечение мультиплексоров WDM должно иметь возможность инсталляции новых кодов, алгоритмов которых позволят автоматически переключиться на резервный канал и построить новый оптический маршрут при сбоях в рабочем канале связи.

Практическая значимость проведенного исследования состоит в том, что разработанные в САПР OptiSystem блок-схемы резервирования каналов WDM могут быть применены для проведения лабораторно-практических работ по дисциплинам кафедры МЭС в соответствии с ФГОС 3++ направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Для этого требуется выполнить компиляцию проекта (файла) с расширением \*.osp, для работы в бесплатной версии САПР OptiPerformer. Для компиляции требуется выполнение ряда затруднительных действий по настройке параметров проекта. Компиляция выполняется в САПР OptiSystem.

Научная новизна исследовательской работы заключается в том, что разработаны новые схемы резервирования оптических каналов WDM, для которых



получены положительные результаты в процессе моделирования, что говорит о их применимости на практике для повышения надежности систем WDM.

Полученные результаты исследования могут быть использованы в качестве справочных данных в научных и учебных целях, а также в производстве телекоммуникационного оборудования WDM.

Следует отметить, что полученные результаты исследования являются оценочными, не имеют практического подтверждения на реальной системе DWDM, и носят рекомендательный, теоретический характер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы: научное издание. - М.: Издательский Дом «Наука», 2013. – 300 с.
- 2 Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Фокин, Р.З. Ибрагимов. - Электрон. текстовые данные. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. - 156 с. – 2227-8397. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/54790.html>
- 3 Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие [для вузов] / О. К. Скляр. - Изд. 2-е, стереотип. - СПб.: Лань, 2010
- 4 Фокин В.Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Г. Фокин. - Электрон. текстовые данные. - Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. - 371 с. - 2227-8397. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/40534.html>
- 5 Цуканов В.Н. Волоконно-оптическая техника [Электронный ресурс]: практическое руководство / Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. - Электрон. текстовые данные. - М.: Инфра-Инженерия, 2015. - 304 с.- Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/23310>
- 6 Довольнов Е.А. Кузнецов В.В., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Мультиплексорное и усилительное оборудование многоволновых оптических систем передачи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 156 с. - Режим доступа: <https://ibooks.ru/reading.php?productid=27919>
- 7 Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учеб. пособие для вузов / - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2008
- 8 Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012 г. - 149 с. - Электронное издание. - УМО. Режим доступа: <http://ibooks.ru/reading.php?productid=27911>

9 Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д., Шарафутдинов Р. М. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2011 г., 368 с. Режим доступа: <http://ibooks.ru/reading.php?productid=333389>

10 Рекомендация ИТУ-Т G.692 (10/1998) «Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-200501-I!Amd1>

11 Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Mohamed Salah Tabour, Ahmed El-Sherbeny. Optical cross connect performance enhancement in optical ring metro network for extended number of users and different bit rates employment. June 2017, Volume 94, Issue 3, pp 927 - 947 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11277-016-3658-1>

12 Каминецкий И.С. Повышение надежности волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением путем организации резервирования на основе уплотнения по длинам волн. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 2007, 18 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-nadezhnosti-volokonno-opticheskikh-sistem-peredachi-so-spektralnym-razdeleniem-pu/read/pdf>

13 Руководящий документ отрасли. Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно. РД 45.195-2001. Издание официальное. МИНСВЯЗИ РОССИИ, Москва, 2001 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850989.pdf>

14 Рекомендация ИТУ-Т G.680 (07/2007) «Physical transfer functions of optical network elements» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.680-200707-I>

15 Рекомендация ИТУ-Т G.695 (07/2018) «Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-201807-I>

16 Рекомендация ITU-T G.698.1 (11/2009) «Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.1-200911-I>

17 Рекомендация ITU-T G.698.2 (11/2018) «Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.1-200911-I>

18 Рекомендация G.808.1 (05/2014) «Generic protection switching - Linear trail and subnetwork protection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.808.1-201405-I>

19 Рекомендация ITU-T G.873.1 (10/2017) «Optical transport network: Linear protection» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.873.1-201710-I>

20 Рекомендация G.873.3 (09/2017) «Optical transport network - Shared mesh protection» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.873.3-201709-I>

21 Трещиков В.Н. Разработка DWDM-системы ёмкостью 25 Тбит/с. ФОТОН-ЭКСПРЕСС, 3 (107), 2013г. с. 31-35 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://t8.ru/?page\\_id=281&lang=en](http://t8.ru/?page_id=281&lang=en)

22 Гайнов В.В., Кобышев В.А., Леонов А.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Скворцов П.И., Трещиков В.Н., Шихалиев И.И., Убайдуллаев Р.Р. «Однопролетные оптические линии связи большой протяженности». Прикладная фотоника Том: 2. №1, 2015 С. 5-22. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23699571>

23 Портнов Э. Л., Фатхулин Т. Д. «Технологии достижения высоких скоростей передачи в современных когерентных DWDM-системах связи». Т-СОММ: телекоммуникации и транспорт. Том: 9, № 8, 2015. С. 34-37. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24275128>

24 Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. «Расчет оптических параметров DWDM-системы». ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ №10, 2015. С. 62-64. Электронный ресурс. – Режим

доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24337280>

25 Ибрагимов Р.З. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методов оценки помехоустойчивости когерентных оптических систем со спектральным уплотнением каналов» Электронный ресурс. – Режим доступа: [https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Science/dissovet/07/2015/Ibragimov\\_R\\_Z/auto.pdf](https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Science/dissovet/07/2015/Ibragimov_R_Z/auto.pdf)

26 Трищев В.Н. «Скоростные DWDM-системы российского производства с канальной скоростью 100 Гбит/с и выше». ФОТОН-ЭКСПРЕСС № 6 (126), 2015 С. 16-17. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24842024>

27 Храпов С.Д., Латипов О.О., Графова Н.С., Старичихин М.Г. «Анализ структуры ВОЛС с DWDM». Современные тенденции развития науки и технологий № 5-3, 2016 С. 126-129. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26166912>

28 Sharan L., Shanbhag A.G., Chaubey V.K. «Design and simulation of modified duobinary modulated 40 Gbps 32 channel DWDM optical link for improved non-linear performance». COGENT ENGINEERING, 2016. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29574025>

29 Богданова Е., Сигаев А., Толстихин И «Имитационное моделирование при разработке высокоскоростных систем DWDM». Первая мила № 1 (54), 2016. С. 54-61 Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25615516>

30 Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Mohamed Salah Tabour, Ahmed El-Sherbeny «Optical cross connect performance enhancement in optical ring metro network for extended number of users and different bit rates employment». Published online: 3 September 2016. Springer Science+Business Media New York 2016. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3658-1>

31 Презентация «WDM the transmode way». Авторское право: © All Rights Reserved. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/>

document/292961302/WDM-The-Transmode-Way

32 Duser.M., Bayvel P. Analysis of a Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture. Journal of Lightwave Technology Vol. 20, Issue 4, pp. 574- (2002) Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.osapublishing.org/jlt/viewmedia.cfm?uri=jlt-20-4-574&seq=0>

33 OptiSystem Tutorials. Introductory Tutorials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://optiwave.com/category/optisystem-manuals/optisystem-tutorials/?filter=undefined>

34 OptiSystem Getting Started Optical Communication System Design Software. Version 12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://dru5cjyjfvrq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OptiSystem\\_Getting\\_Started.pdf](https://dru5cjyjfvrq.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/04/OptiSystem_Getting_Started.pdf)

35 OptiSystem Tutorials - C++ Component Optical Communication System Design Software. Version 14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://optiwave.com/pdf/OptiSystem\\_Tutorials\\_Cpp\\_Component.pdf](https://optiwave.com/pdf/OptiSystem_Tutorials_Cpp_Component.pdf)

36 OptiSystem Manuals. OptiSystem Tutorialshttps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://optiwave.com/resources/latest-news/optisystem-16-0-new-version>

37 Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г. Моделирование протяженных волоконно-оптических линий передачи DWDM в среде Optisystem. Телекоммуникации. Издательство: ООО «Наука и технологии», №2, 2012, С.30-34.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- ABX – Амплитудно-волновая характеристика
- ВОЛС – Волоконно-оптическая линия связи
- ВОСП – Волоконно-оптическая система передачи
- ИОИ – источника оптического излучения
- МСЭ-Т – Международный союз электросвязи и телеграфии
- ОУ – Оптический усилитель
- ОЭО – Оптоэлектрооптический
- РБО – Распределенное Брэгговское отражение
- САПР – Системам автоматизированного проектирования
- ATM – Asynchronous Transport Module
- AWG (Arrayed Waveguide Grating)
- BER – Bit Error Rate
- Ch – Channel
- CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing
- DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing
- DP - Double Polarization
- DP-16QAM – Double Polarization - 16 Quadrature Amplitude Modulation
- DP-QPSK – Double Polarization- Quadrature Phase Shift Keying
- EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier
- HDWDM – High-Dense Wavelength Division Multiplexing
- IMZ – Interferomet Mach-Zehnder
- IP – Internet Protocol
- ITU-T – International Telecommunication Union- Telegraphy
- MEMS – Micro-Electro Mechanical Systems
- MPLS – Multiprotocol Label Switching
- MUX – Multiplexer
- NRZ – Non Return to Zero
- OADM – Optical Add Drop Multiplexor

OCS – Optical Cross Switch  
OMUX – Optical multiplexer  
OS – Optical switch  
OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio)  
PLC – Polarizing splitter  
REG – Regenerator  
ROA – Raman Optical Amplifier  
ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer  
Rx – Receiver  
RZ – Return to Zero  
SFP – Small Form-factor Pluggable  
STM-N – Synchronous Transport Module  
SW – Switch  
TDM – Time Division Multiplexing  
TFF – Thin Film Filter  
TM – Terminal Multiplexer  
Tx – Transmitter  
VCSEL – Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser  
VOA – Variable Optical Attenuator  
WB – Wavelength Blocker  
WDM – Wavelength Division Multiplexing  
WSS – Wavelength Selective Switch



## ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ

Глаз-диаграмма – это суммарный вид всех битовых периодов измеряемого сигнала, наложенных друг на друга.

Канал связи – это система технических средств и среда распространения сигналов для односторонней передачи данных (информации) от отправителя (источника) к получателю (приёмнику).

Коэффициент битовых ошибок (BER – Bit Error Rate) – это отношение числа ошибочно принятых бит (символов), к общему числу переданных бит (символов) за время тестирования.

Резервирование – это метод повышения надёжности технических устройств путём введения в их состав (структуру) дополнительных элементов (узлов, связей) по сравнению с минимально необходимыми для выполнения заданных функций.

Схема резервирования 1+1 – это схема, в которой, резервный элемент (приемник) выполняет ту же работу, что и основной (горячий резерв).

Схема резервирования 1:1 – это схема, в которой, резервный элемент (приемник) не активен и включается в работу только при выходе из строя резервируемого элемента (приемника).

САПР OptiSystem – это среда графического моделирования, которая позволяет быстро и дешево разработать натурную модель сети, позволяет понять протекание процессов как в отдельных блоках, так в системе в целом, а прямой доступ к многочисленным настройкам данных, определяющих характеристики ВОСП, позволяет выполнить «глубокое» исследование оптической системы.

Технология WDM – это транспортная технология связи, которая позволяет передавать по одному волокну на различных оптических длинах волн цифровые данные со скоростью десятки, сотни гигабит в секунду.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня РИНЦ**

1) Шестакова Д.П., Салифов И.И. ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ В СИСТЕМАХ WDM. Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, Часть II - Ростов-на-Дону.: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2019, 244с. – С. 147-151

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК**

2) Шестакова Д.П., Салифов И.И., Шестаков И.И. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ DWDM. Публикация статьи в ВАК журнале T-Comm Том 13. №7-2019. – С. 21-31

3) Шестакова Д.П., Салифов И.И., Шестаков И.И.\*, Гниломедов Е.И., Букрина Е.В. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ НОВЫХ СХЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ НА СЕТЯХ WDM. Публикация статьи в ВАК журнале Телекоммуникации. ООО "Наука и технологии" (Москва). № 6, 2020. – С. 23-29

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал)  
в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

**ГРАФИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ  
К МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**на тему: Исследование вопросов организации резервирования оптических  
каналов в системах WDM**

- 1) Резервирования канала на оптическом уровне по схеме 1:1 и 1+1;
- 2) Типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом;
- 3) Схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с резервированием транспондеров на основе пассивных компонентов;
- 4) Схема резервирования оптических каналов WDM в линейной топологии, на уровне транспондеров;
- 5) Блок-схема участка сети WDM;
- 6) Блок-схема мультиплексора MUX\_A, MUX\_C, MUX\_B;
- 7) Результаты моделирования: спектральные значения каналов WDM;
- 8) Результаты моделирования: глаз-диаграммы и коэффициент ошибок;
- 9) Маршруты прохождения основного и резервного канала WDM;

Магистрант гр. МИТЕ-81

\_\_\_\_\_/Д.П. Шестакова  
(подпись) (Ф.И.О.)

Научный руководитель работы

к.т.н.      доцент  
уч. степ.      уч. звание

\_\_\_\_\_/И.И. Салифов  
(подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
уч. степ.      уч. звание

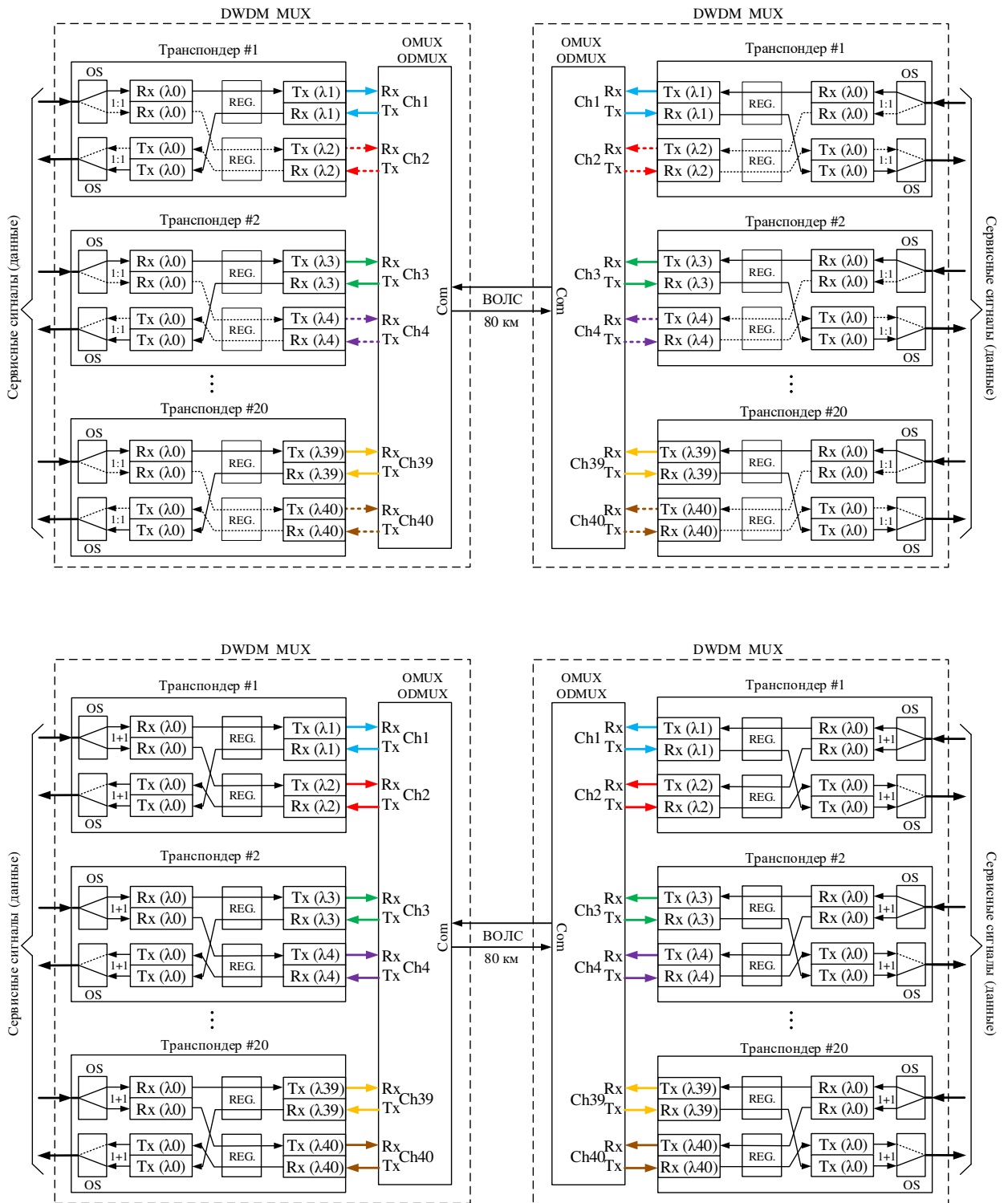
\_\_\_\_\_/      /  
(подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтролер

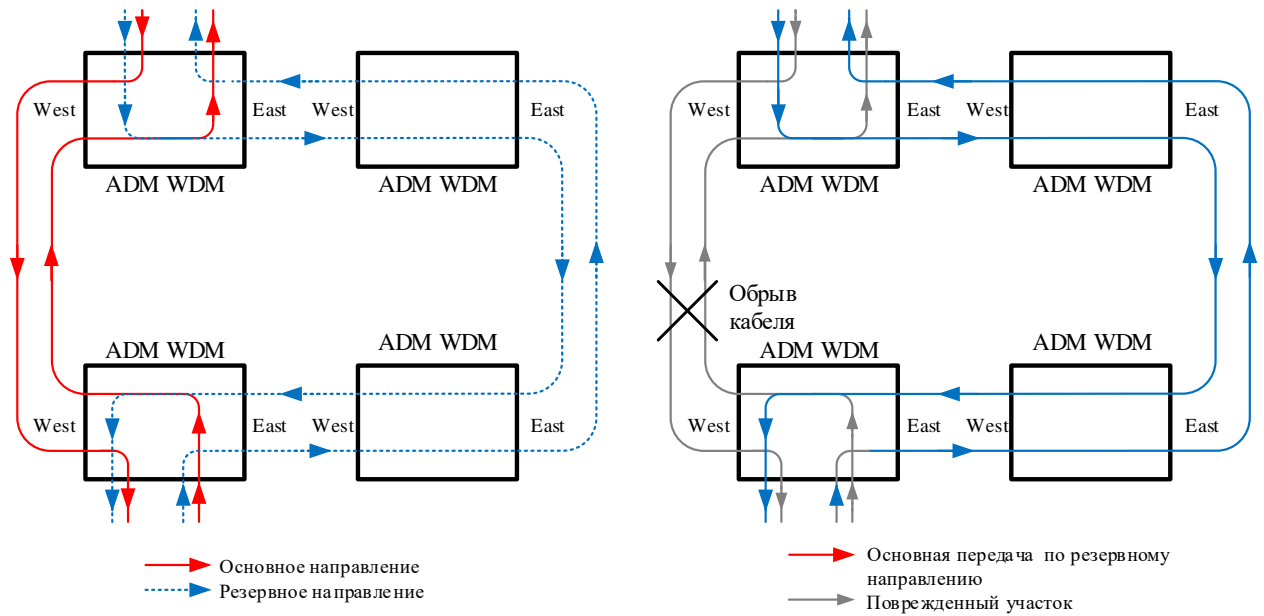
\_\_\_\_\_/Е.В. Букрина  
(подпись) (Ф.И.О.)

Екатеринбург  
2020

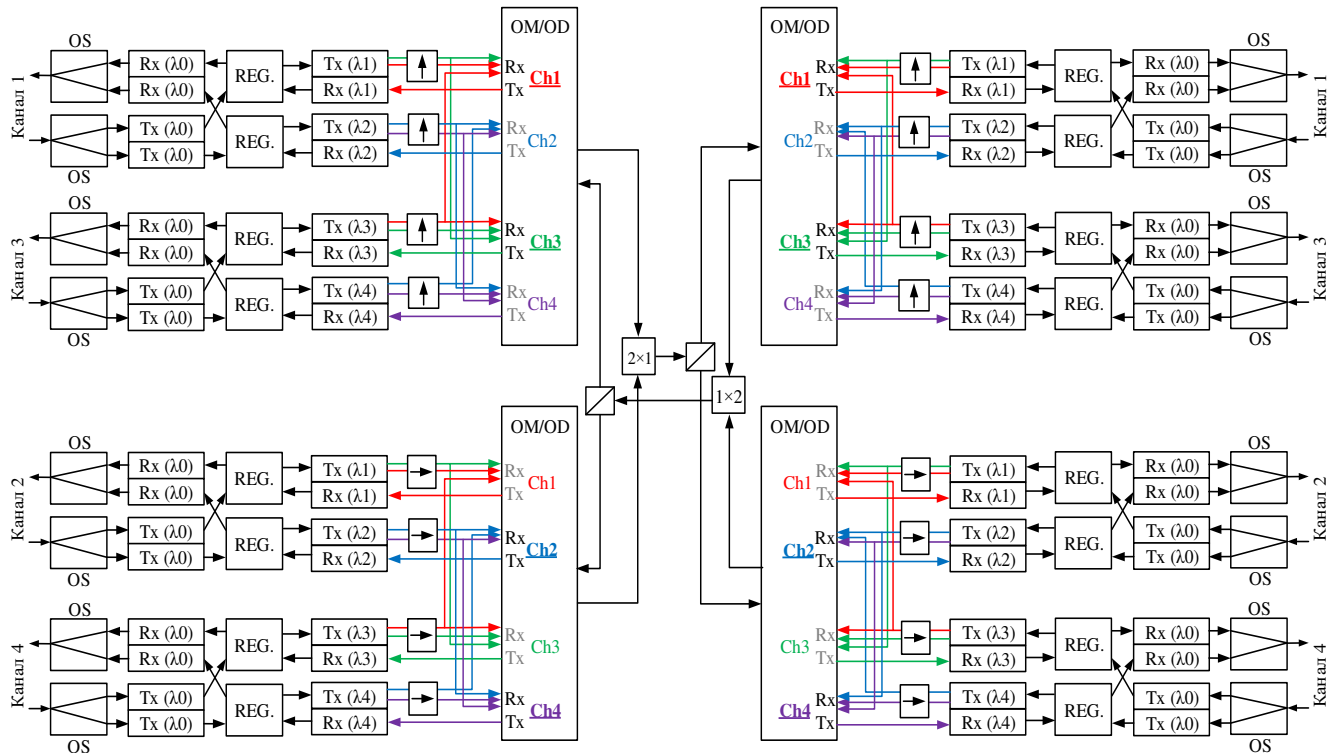
# 1) Резервирования канала на оптическом уровне по схеме 1:1 и 1+1



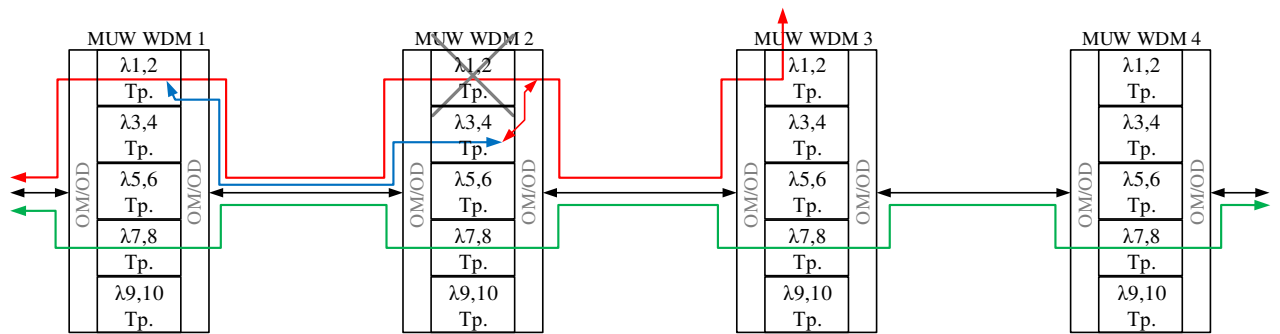
## 2) Типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом



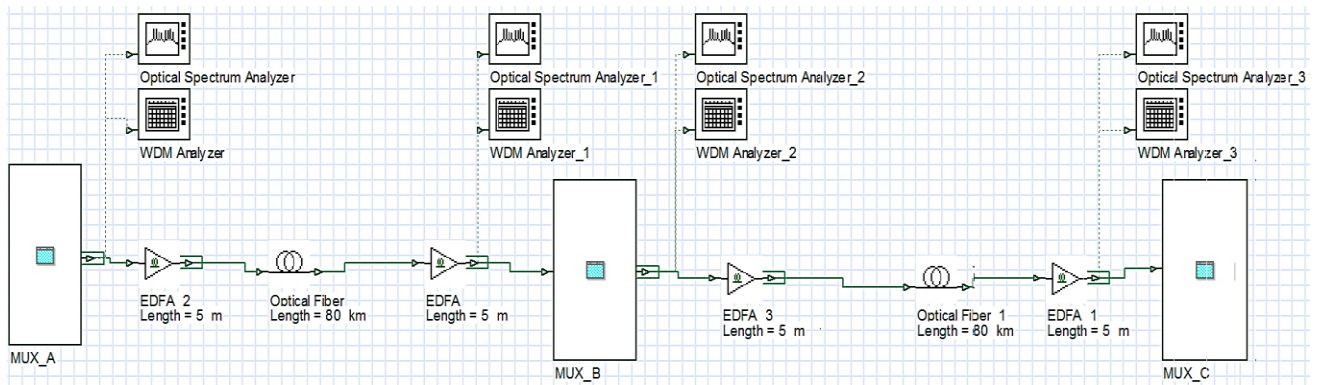
### 3) Схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с резервированием транспондеров на основе пассивных компонентов



4) Схема резервирования оптических каналов WDM в линейной топологии, на уровне транспондеров

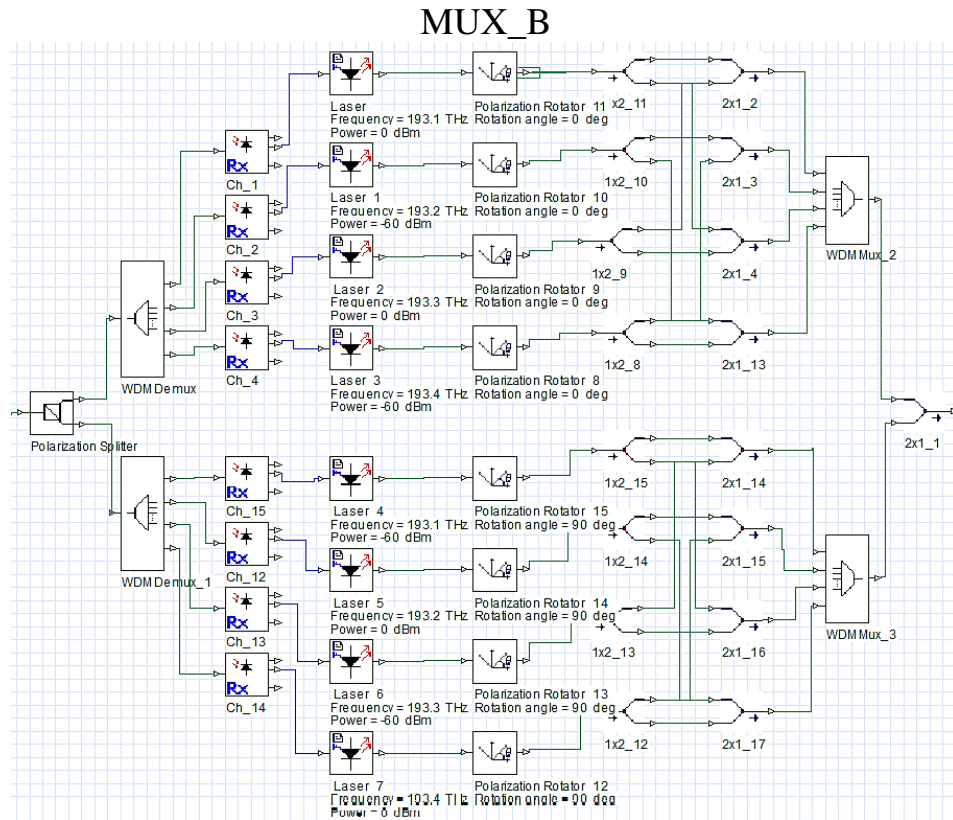
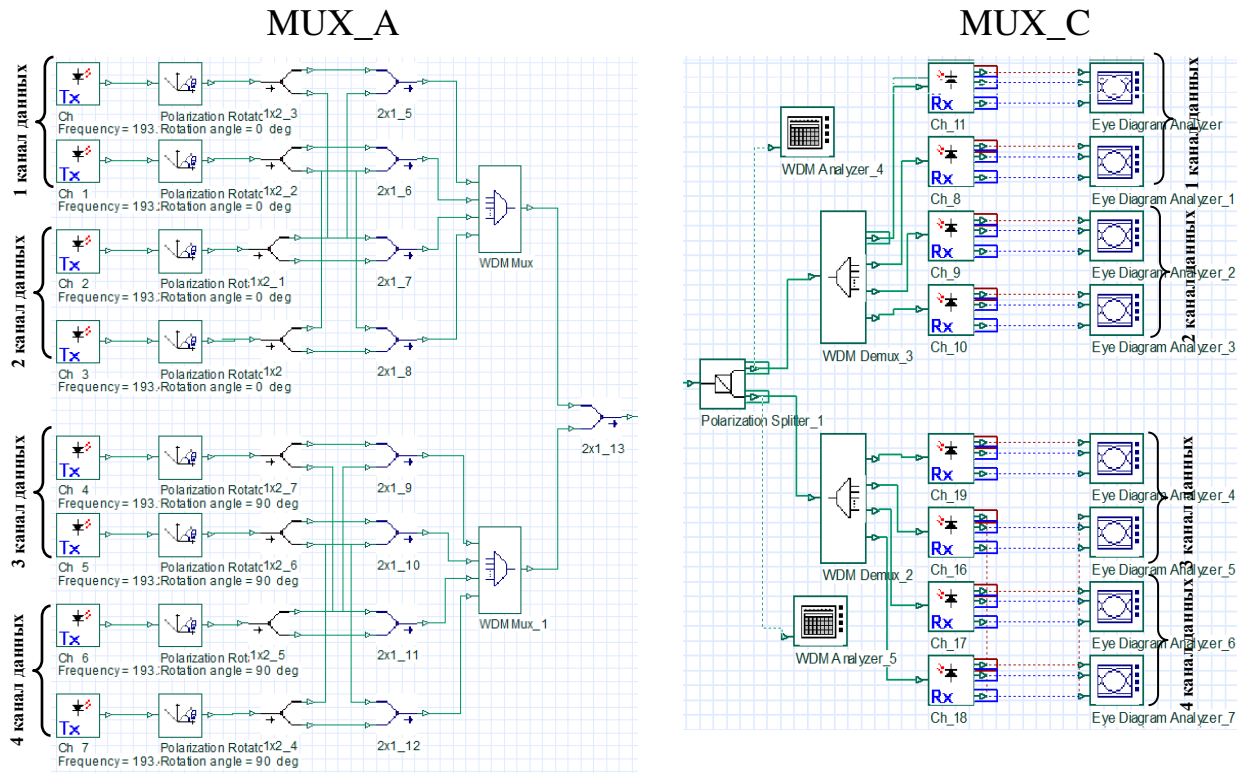


## 5) Блок-схема участка сети WDM

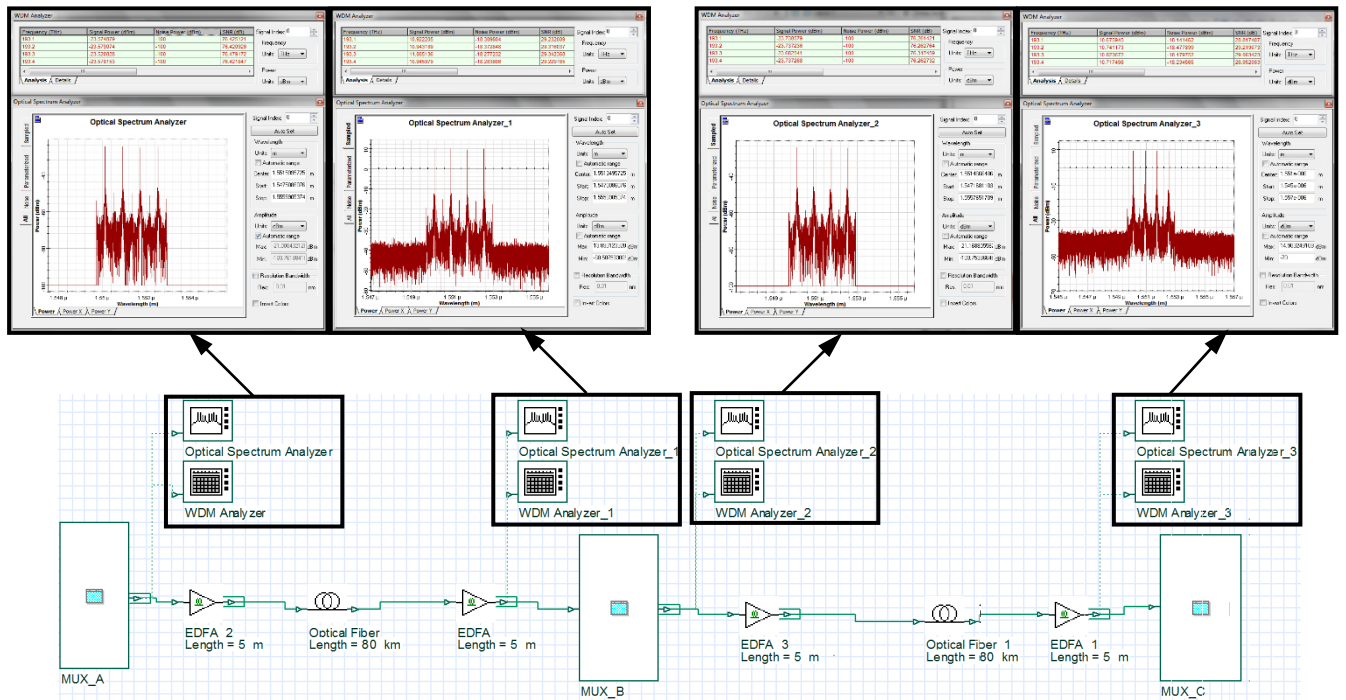




## б) Блок-схема мультиплектора MUX\_A, MUX\_C, MUX\_B



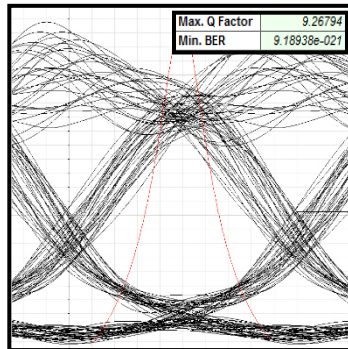
## 7) Результаты моделирования: спектральные значения каналов WDM



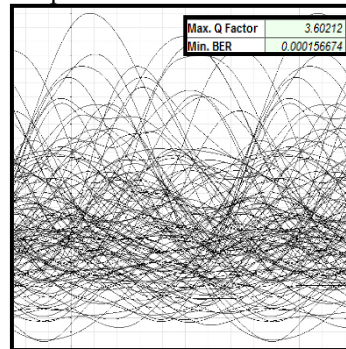
## 8) Результаты моделирования: глаз-диаграммы и коэффициент ошибок

1 канал данных

Рабочий оптический канала

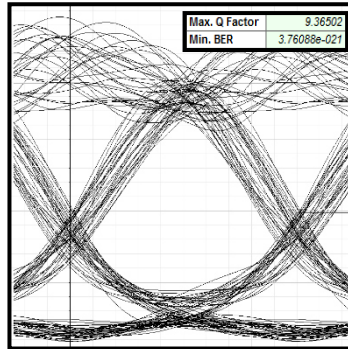


Резервный оптический канала

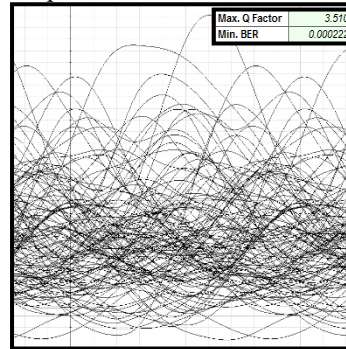


2 канал данных

Рабочий оптический канала

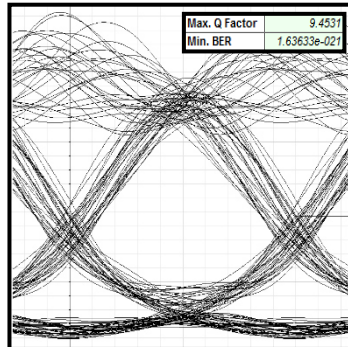


Резервный оптический канала

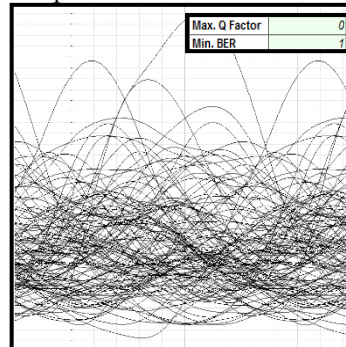


3 канал данных

Рабочий оптический канала

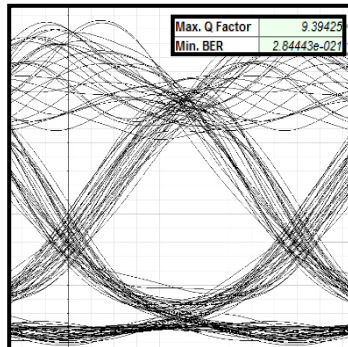


Резервный оптический канала

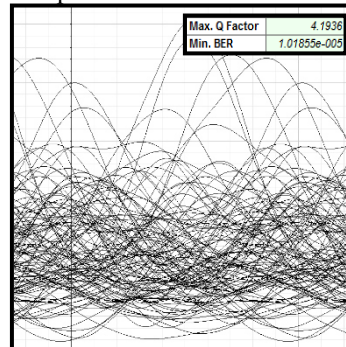


4 канал данных

Рабочий оптический канала



Резервный оптический канала



## 9) Маршруты прохождения основного и резервного канала WDM

