

Шестакова Дарья Павловна

**Исследование вопросов организации резервирования
оптических каналов в системах WDM**

Направление подготовки 11.04.02
Инфокоммуникационные технологии и системы связи
профиль «Многоканальные системы передачи»
программа академической магистратуры

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации
на соискание квалификации (степени) магистра

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель к.т.н., доцент кафедры МЭС

И.И. Салифов

Рецензент к.ф-м.н., доцент

В.Т. Куанышев

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9:00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

Секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

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 протяженность 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 отличии 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., Скляров 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.

Объект исследования – транспортная сеть связи технологии WDM, в частности DWDM.

Предмет исследования – оптический канал WDM, как основной, так и резервный.

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

Для достижения означенной цели необходимо решить следующие задачи:

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

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

Теоретическая значимость исследования является изложенная идея применения новых схем резервирования оптических каналов WDM, путем интеграции пассивных компонентов (поляризаторы, поляризационный разветвитель, оптический разветвитель) в проектируемое или действующее оборудование DWDM.

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

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

Положения, выносимые на защиту:

- традиционные схемы резервирования оптических каналов WDM;
- разработанные новые схемы резервирования оптических каналов WDM в системах с плотным волновым спектральным мультиплексированием;
- результаты моделирования разработанных схем резервирования в САПР OptiSystem.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что:

- теория построена на основополагающих данных с использованием методов теории принятия решений, теории моделирования и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- идея базируется на анализе традиционных схем резервирования, описанных в рекомендациях МСЭ-Т, в рабочих документациях, в учебной литературе;
- использована современная САПР OptiSystem, которая ориентирована на моделирование, разработку и прототипирование систем связи.

Апробация результатов.

Результаты диссертации обсуждались на международной научно-практической конференции «ИНФОКОМ – 2019» (29 – 30 апреля 2019 года, Ростов-на-Дону). По теме диссертации опубликовано 3 научных работы, в том числе 2 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК, 1 статьи в сборниках и периодических изданиях РИНЦ. Кроме этого, теоретическая основа диссертации будет применена в учебном процессе в качестве лекционных занятий по дисциплинам кафедры МЭС: «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Транспортные сети связи» – профиль «Транспортные сети и системы связи»; «Синхронные транспортные сети», «Транспортные сети и системы с волновым мультиплексированием» – профиль «Технологии и системы оптической связи». А разработанные схемы резервирования в САПР OptiSystem будут применены для постановки лабораторных работ по этим дисциплинам.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 37 наименований, перечень сокращений, перечень терминов. Объем диссертации 94 страницы, включены также 62 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Современный мир инфокоммуникаций базируется на транспортных технологиях сетей 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 резервирования 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.

В первой главе (Анализ научных публикаций и исследований в области резервирования каналов WDM) рассмотрена технология волнового спектрального мультиплексирования (WDM), а именно рассмотрены базовые компоненты WDM, на основе которых строятся сети с волновым спектральным мультиплексированием различных топологий, рассмотрена структура линейного тракта системы WDM.

Рассмотрены традиционные схемы резервирования оптических каналов WDM. Так, 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. На рисунках 1 – 4 представлены типовые схемы резервирования оптических каналов на уровне транспондеров, на рисунках 5 и 6 представлены типовые схемы защиты оптических маршрутов WDM. Кроме этого, на практике применяют простейший вариант резервирования оптических каналов и маршрутов – применение кольцевой топологии сети WDM, как показано на рисунке 7.

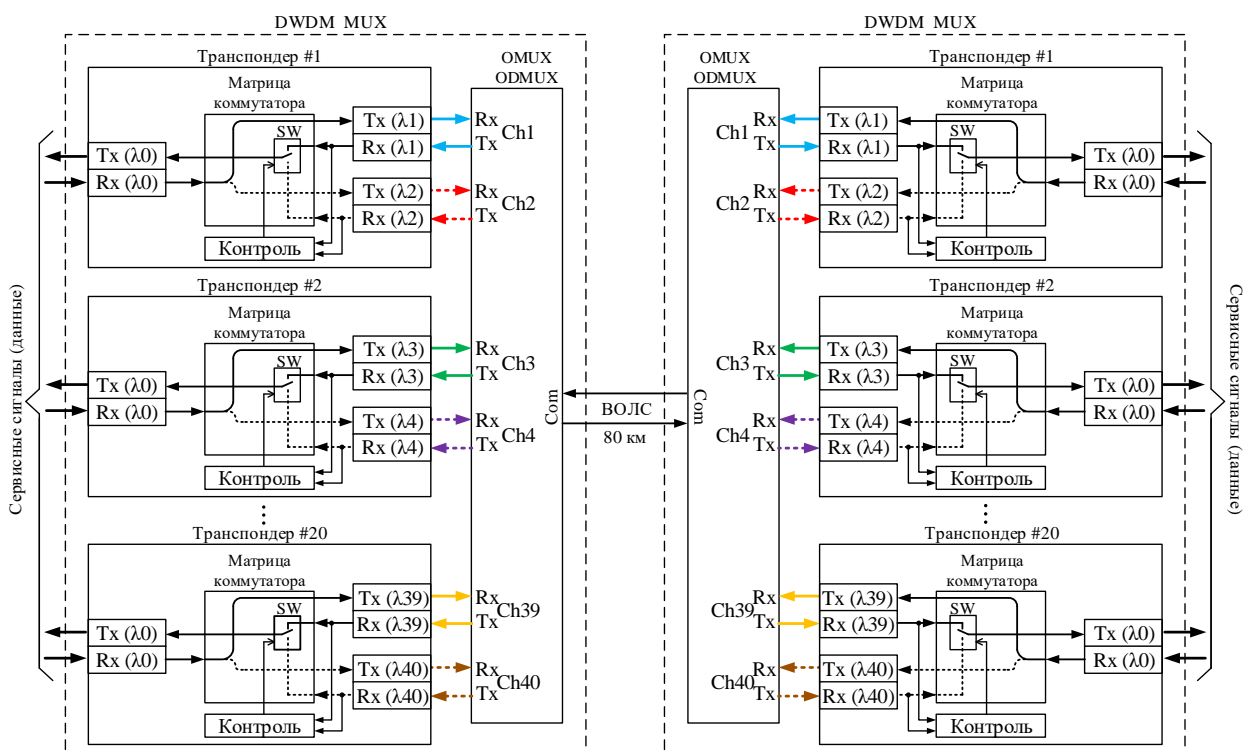


Рисунок 1 – Резервирование оптического канала на электрическом уровне по схеме 1:1

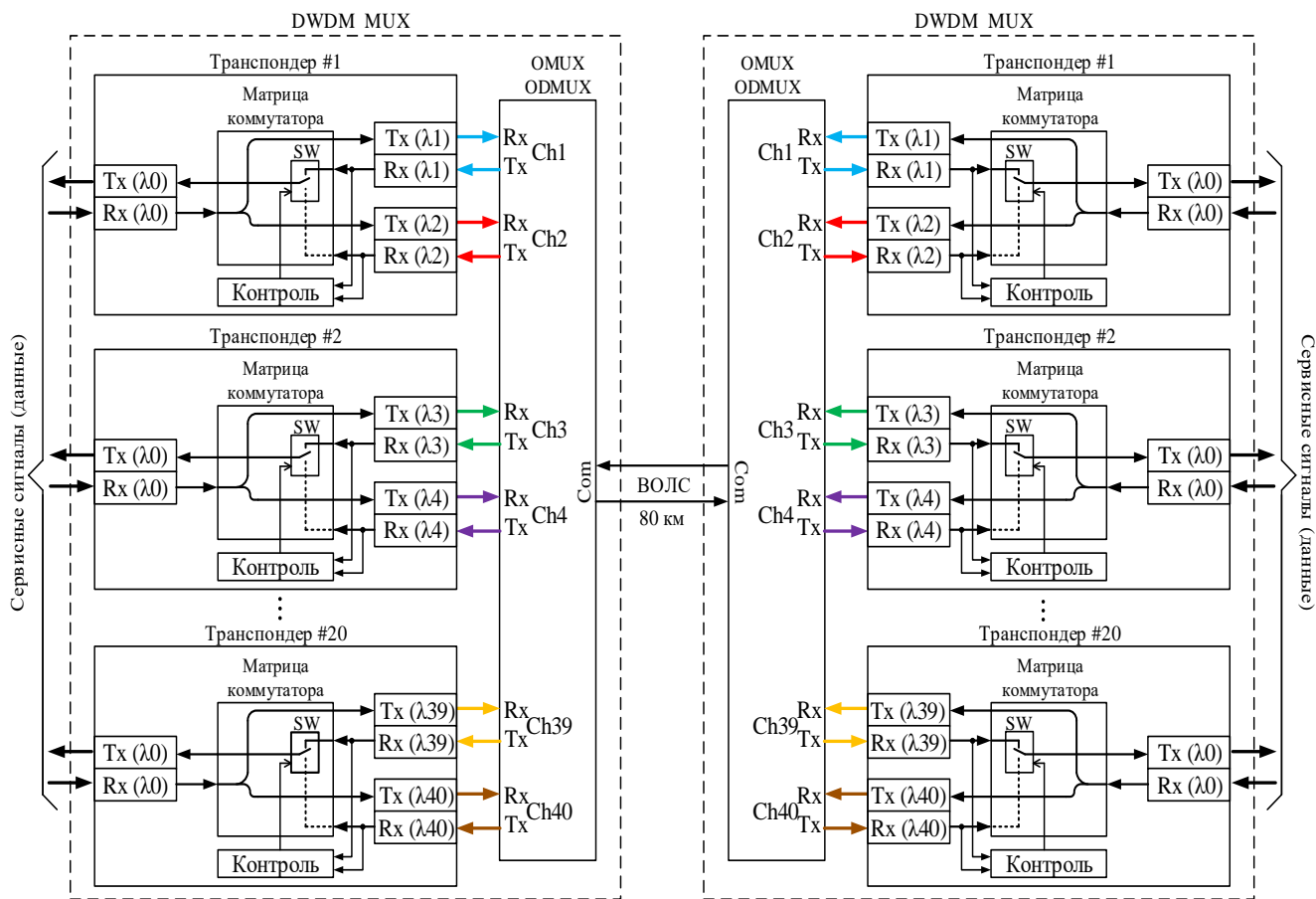


Рисунок 2 – Резервирование оптического канала на электрическом уровне по схеме 1+1

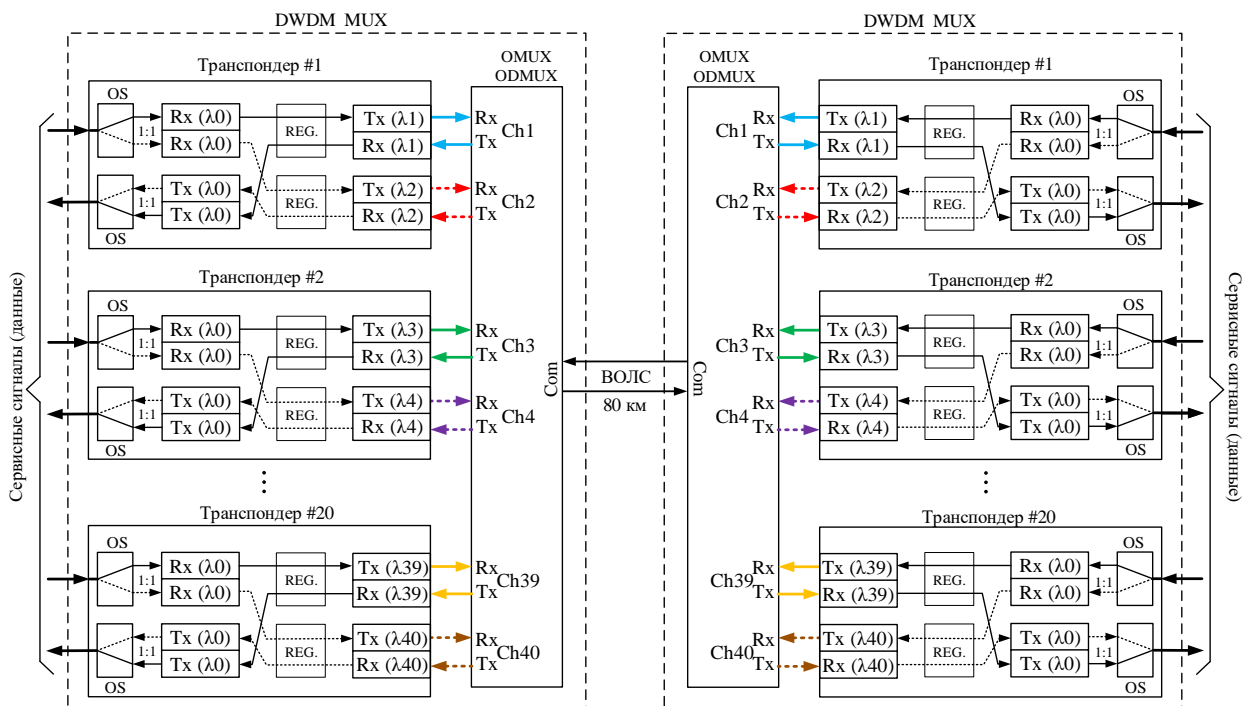


Рисунок 3 – Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1:1

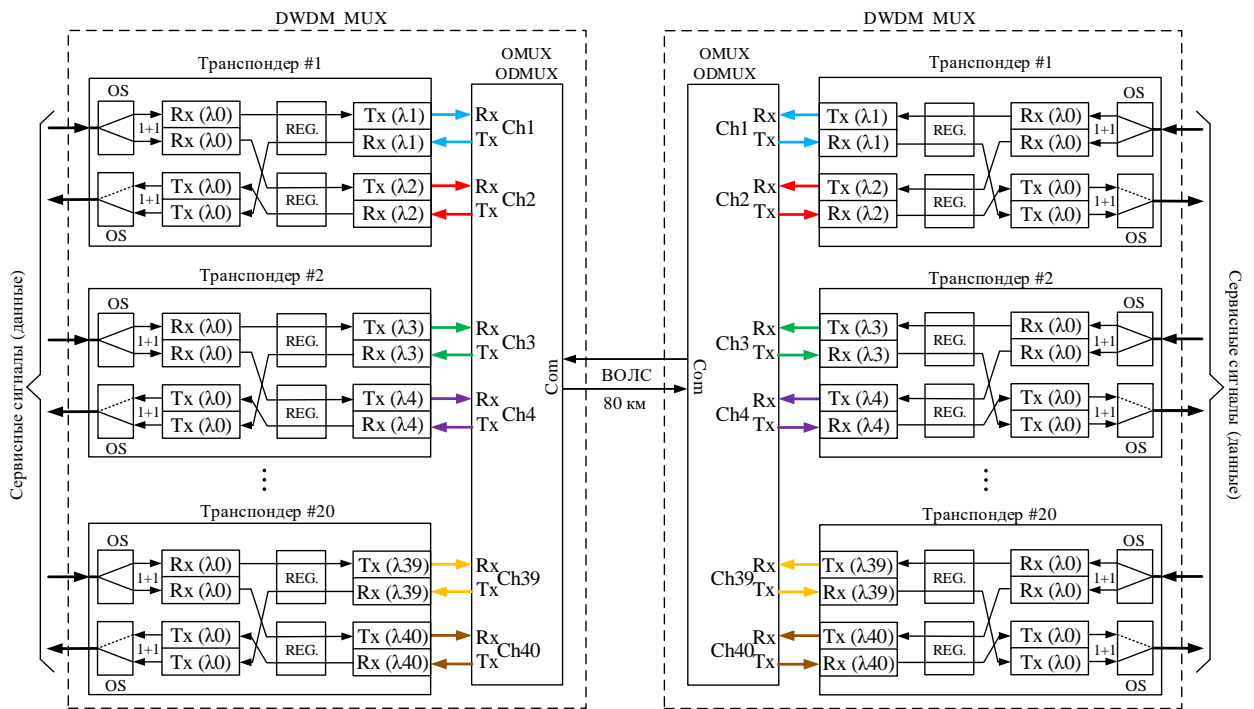


Рисунок 4 – Резервирование оптического канала на оптическом уровне по схеме 1+1

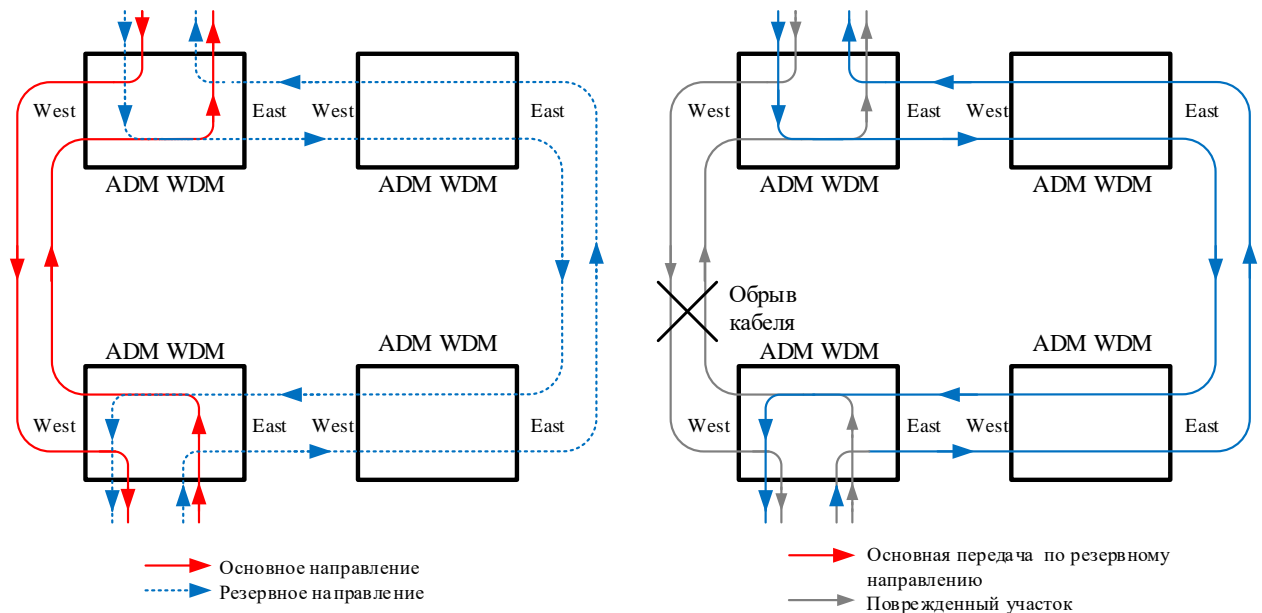


Рисунок 7 – Типовая конфигурация сети WDM с защитным оптическим кольцом

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 подобного недостатка, 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.

Во второй главе (Разработка новых вариантов схем резервирования каналов WDM) произведена разработка новых схем резервирования оптических каналов и маршрутов WDM в системах с волновым спектральным мультиплексированием, в частности для систем DWDM.

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 на оптическом уровне без применения 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.

Так, на рисунке 8 представлена одна из восьми новых схем резервирования оптических каналов (маршрутов) WDM, которая позволяет реализовать стопроцентное резервирование, задействовать все выделенные оптические каналы, а это 96 каналов, для передачи данных, и организовать 96 резервных каналов WDM в другой плоскости поляризации. Стоит отметить, что для реализации стопроцентного резервирования, требуется задействовать оптических кросс-коммутаторов малой емкости, которые интегрируются в транспондеры, как показано на рисунке 8.

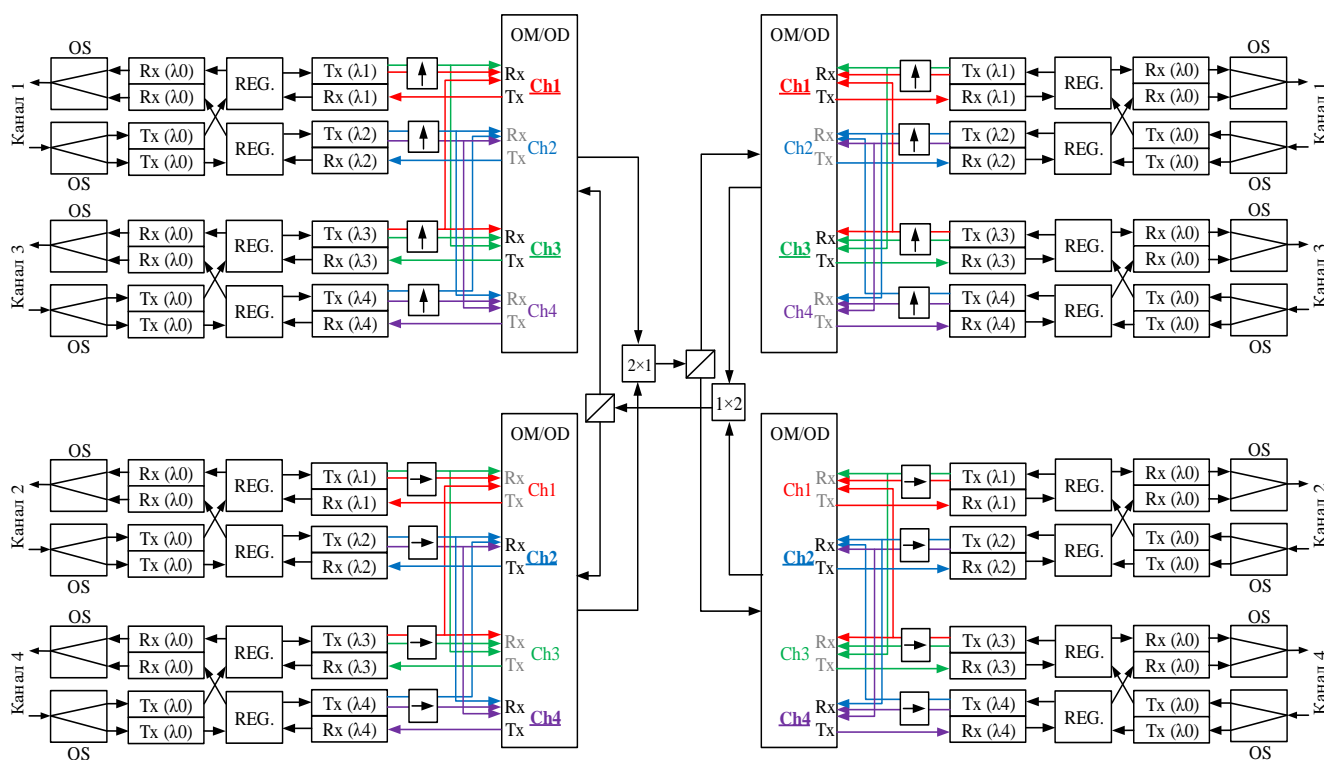


Рисунок 8 – Новая схема резервирования оптических каналов на оптическом уровне с резервированием транспондеров

На рисунке 9 представлен принцип работы схемы резервирования, представленной на рисунке 8. Если применить подобную схему на участке сети WDM кольцевой, ячеистой или линейной топологии, можно обойтись без ROADMs и кросс-коммутаторов большой емкости.

Разработанные схемы резервирования позволяют организовать защиту каналов WDM пропускной способностью не более 40 Гбит/с, поскольку скорость оптического канала в данных схемах ограничивается форматом модуляции оптической несущей. Так, применение разработанных схем возможно на линиях WDM, где не применяется модуляция в сочетании с поляризационным мультиплексированием, например, DP-QPSK или PM-QPSK.

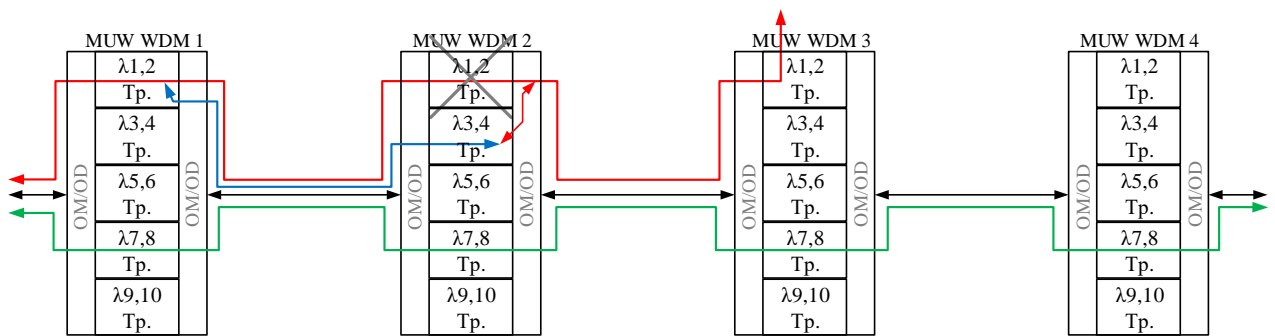


Рисунок 9 – Принцип работы новой схемы резервирования в случае аварии на линии системы WDM

В третьей главе (Моделирование новых схем резервирования каналов WDM) изложены результаты моделирования разработанных новых схем резервирования оптических каналов (маршрутов) WDM в системах DWDM.

Для оценки применимости разработанных схем резервирования оптических каналов WDM на практике, выполнено моделирование. Для моделирования, был выбран программный продукт, в частности система САПР (Система Автоматизации Проектных Работ) OptiSysytem, представлено описание интерфейса, библиотек, принцип работы в среде САПР OptiSysytem.

Моделирование выполнено при следующих условиях:

- 1) для простоты моделирования рассмотрена сеть DWDM топологии «линейная цепь» с одним промежуточным узлом без усилительных пунктов;
- 2) длина секции мультиплексирования принята 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 составило четыре;
- 5) в качестве линейного кодирования применен код формата RZ (NRZ), как самые распространённый и простой формат линейного кодирования;
- 6) для меньшего влияния перекрестных помех и межсимвольной интерференции на качество связи, скорость интерфейсного потока составило 10 Гбит/с;
- 7) тип волокна – одномодовое стандартное волокно рекомендации ITU-T G.652
- 8) моделирование резервирования на уровне транспондеров не рассматривалось, на основании того, что данный способ резервирования является традиционным и применяется на практике;
- 9) для ухода от громоздкости схем (кода программы), рассмотрен симплексный режим передачи четырех каналов WDM.

На основании поставленных задач, в среде САПР OptiSystem разработаны блок-схемы для трех схем из пяти.

На основании приведённых условий моделирования, в работе рассмотрено моделирование трех схем резервирования из пяти. Обосновано это тем, что разработанные схемы резервирования однотипны, разница только в резервировании на уровне транспондеров, а согласно представленным условиям моделирования, моделирование транспондеров рассматриваться не будет.

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

В качестве примера, на рисунке 10 представлена разработанная блок-схема в OptiSystem для схемы, представленной на рисунке 8, с учетом вышесказанных условий. Отличительной особенностью блок-схемы является применение подсхем, которые позволяют уменьшить размеры блок-схемы на рабочем поле. Блок-схема, представленная на рисунке 10 имеет три подсхемы, которые представляют собой оконечные (MUX_A и MUX_C) и промежуточный (MUX_B) мультиплексоры,

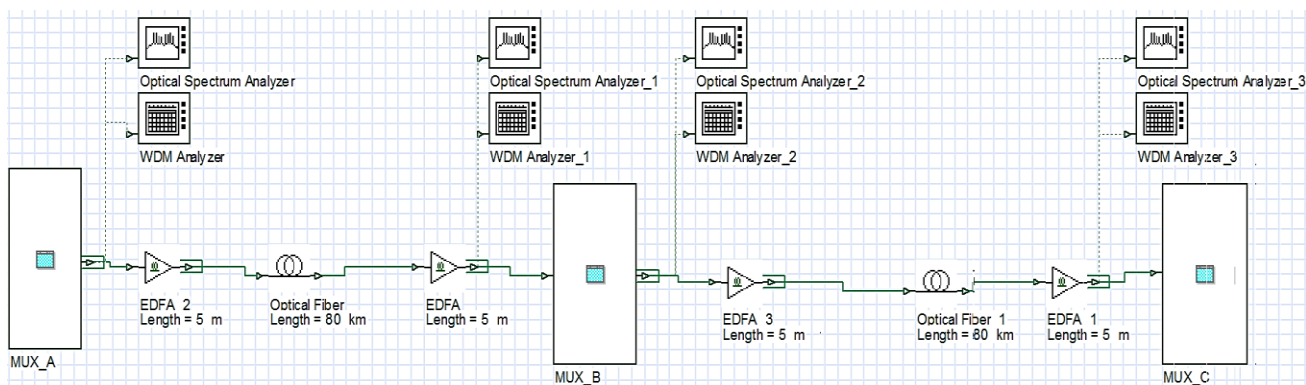


Рисунок 10 – Блок-схема участка сети WDM

Блок-схема мультиплексора MUX_A и MUX_C представлена на рисунке 11. Блок-схема промежуточного мультиплексора MUX_B представлена на рисунке 12.

Результаты моделирования 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 рисунке 13. 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 отличие 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 13.

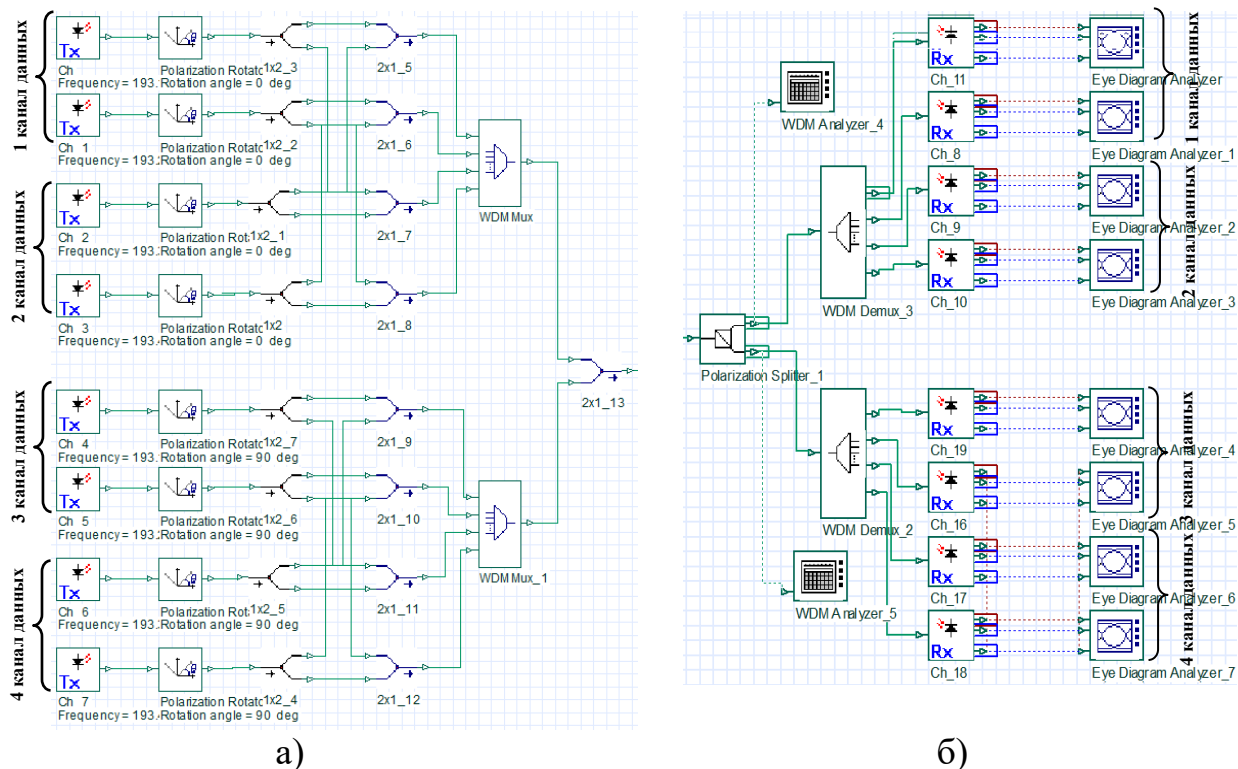


Рисунок 11 – Блок-схема мультиплексора: а) MUX_A; б) MUX_C

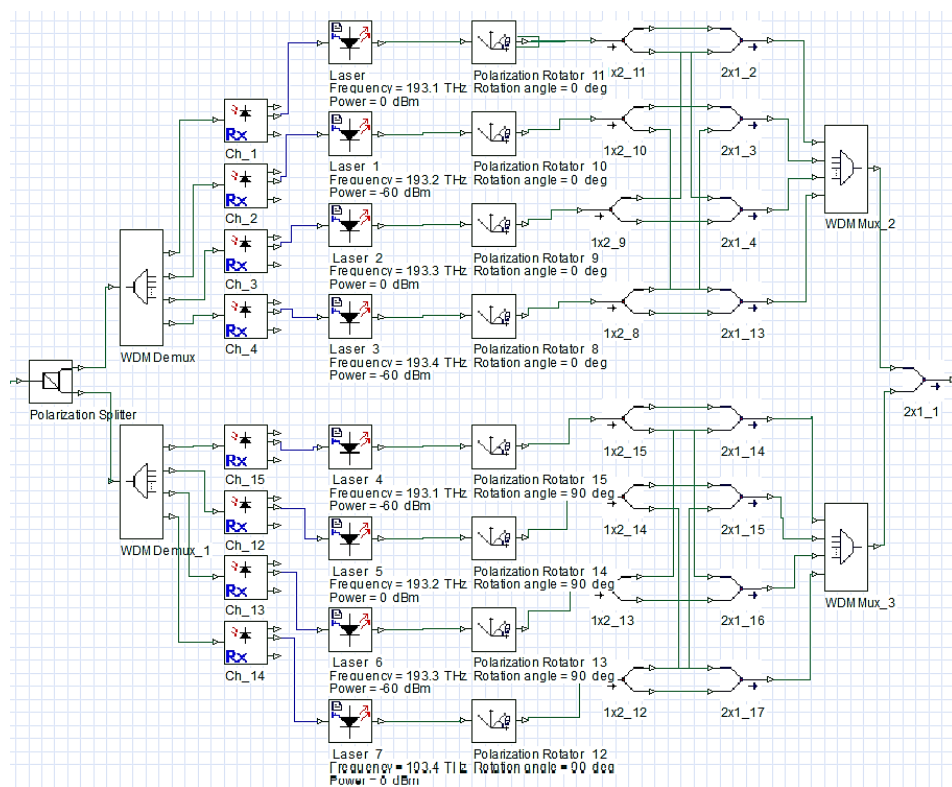


Рисунок 12 – Блок-схема мультиплексора MUX_B

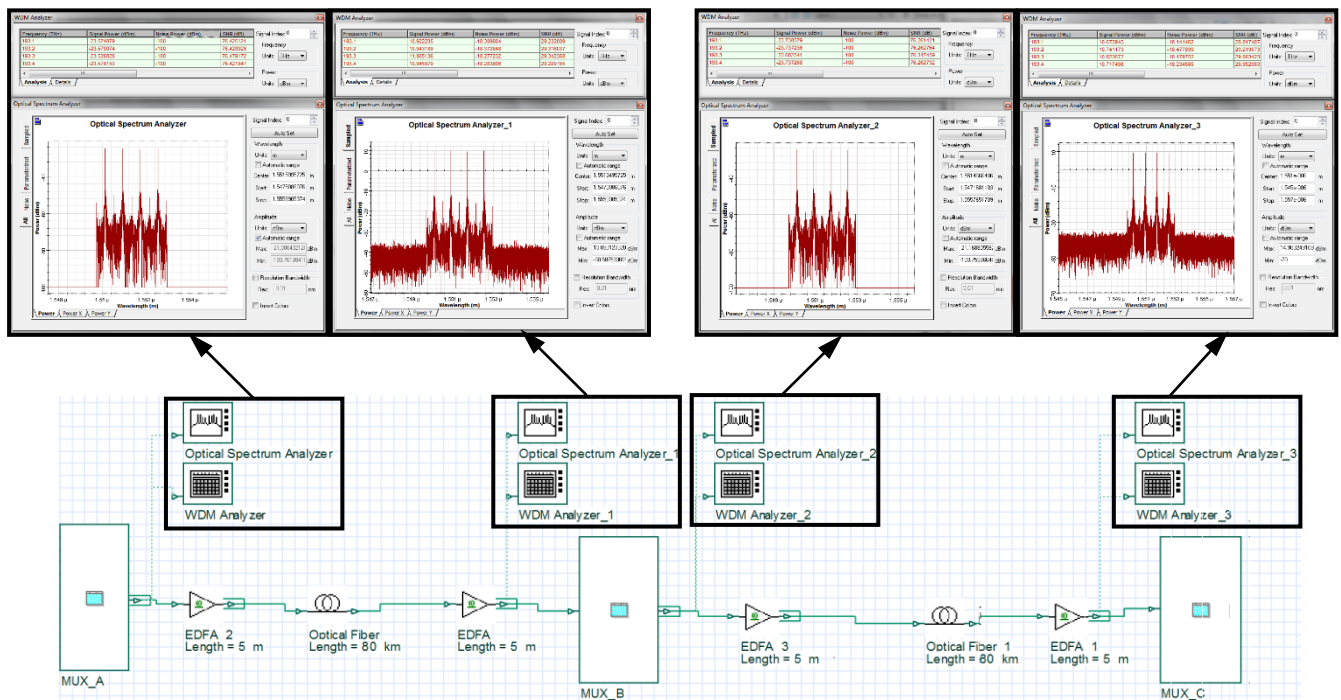


Рисунок 13 – Результаты спектральных значений оптических каналов

На рисунке 14 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.

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

Для проверки работоспособности схемы в режиме резервирования, смоделирован 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_B, как показано на рисунке 15. 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 задавалась 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 дБм), частота канала меняется с 193,2 ТГц (частота канала, установленная по умолчанию) на 193,4 ТГц;
- 2) в мультиплексоре MUX_B активируется резервный четвертый оптический канала второго канала данных (Power = 0 дБм), частота канала

меняется с 193,4 ТГц (частота канала, установленная по умолчанию) на 193,2 ТГц.

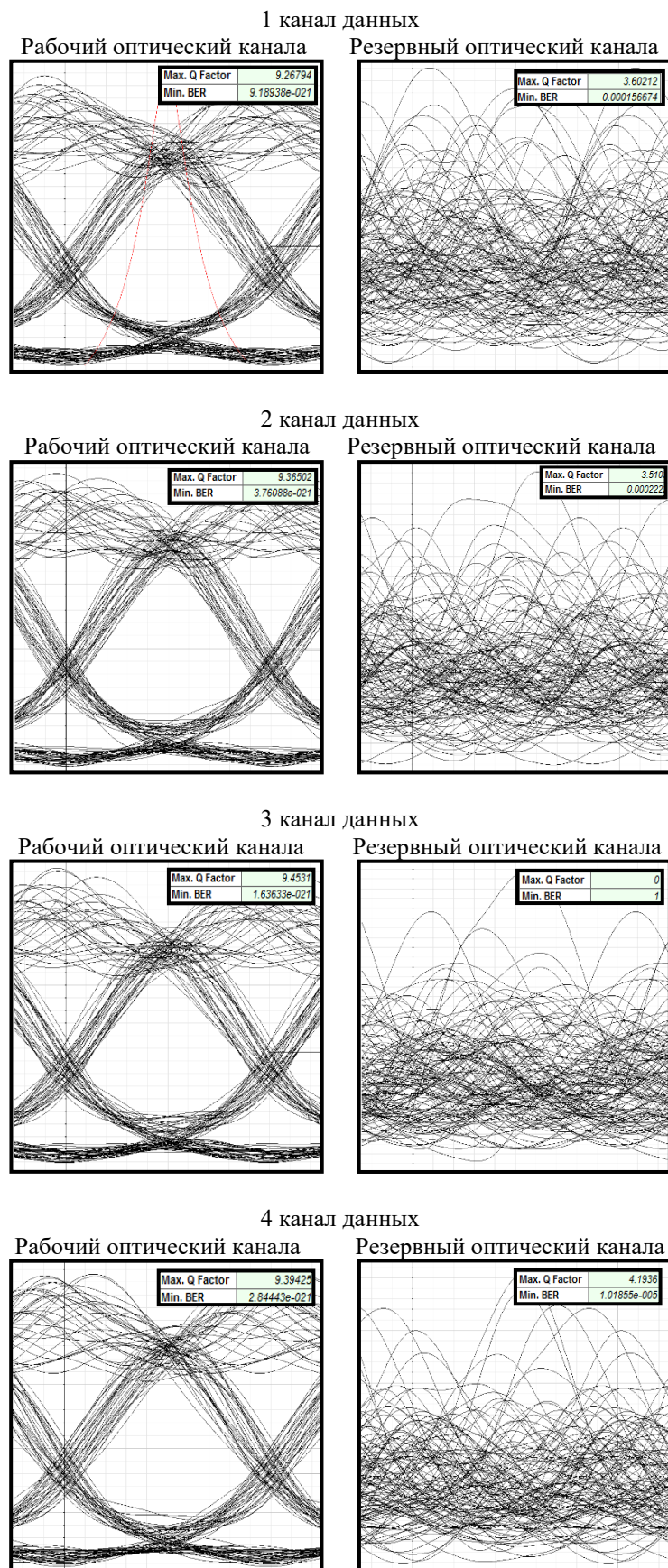


Рисунок 14 – Глаз-диаграммы и коэффициент ошибок оптических каналов данных

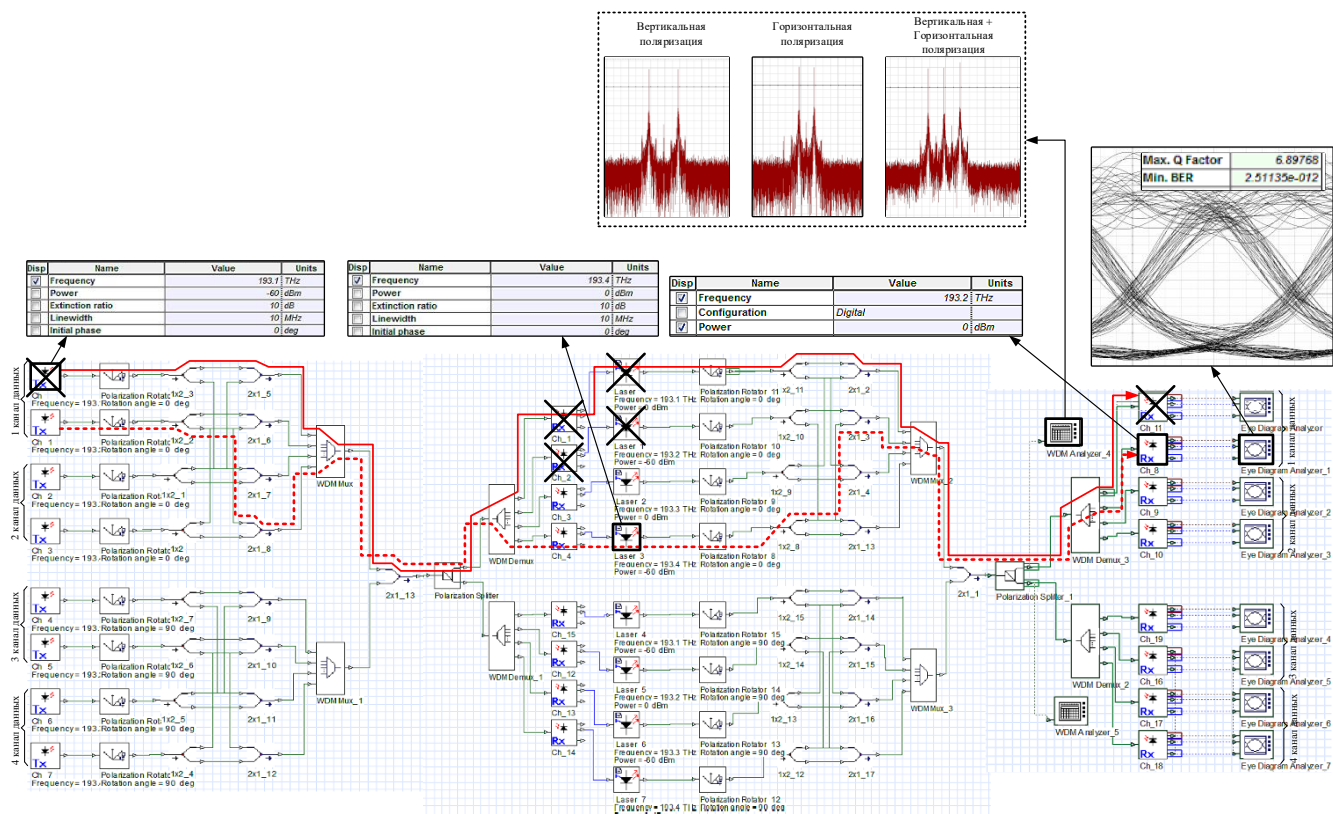


Рисунок 15 – Маршруты прохождения основного и резервного тракта передачи данных первого клиентского канала

На рисунке 15 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 8×10^{-9} , согласно расчетам, приведенных в магистерской работе. Стоит отметить, что на рисунке 10 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.

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 канала и построить новый оптический маршрут при сбоях в рабочем канале связи.

Основные теоретические и практические результаты работы.

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 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