

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)

**С.Н. Шарангович**

## **МНОГОВОЛНОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и  
самостоятельной работе

**2022**

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

ББК 32.854

Ш 25

Рецензент:

**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф. каф.  
квантовой электроники и оптоинформатики Том. гос. ун-та.

### **Шарангович С.Н.**

Многоволновые оптические системы связи: учеб. метод. пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе / С.Н. Шарангович.. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 51 с.

Цель данного пособия - рассмотреть все виды самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «Многоволновые оптические системы связи».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на литературу. Описан компьютерный лабораторный практикум с примером оформления отчетов.

Представлен перечень практических занятий и индивидуальных расчетных заданий. Дан пример решения расчетных работ. Приводится список вопросов тестового контроля и зачетных вопросов.

Предназначено для студентов очной и заочной форм технических вузов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

УДК 621.396.22.0297[621.315.2:621.39]

ББК 32.854

ISBN

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2022

© Шарангович С.Н. 2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА.....	6
2.1. Разделы лекционного курса.....	7
3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ .....	9
3.1. Программы выполнения компьютерных лабораторных работ .....	14
3.2. Пример выполнения лабораторной работы .....	26
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ.....	30
4.1. Варианты заданий.....	30
4.2. Пример выполнения расчетного задания .....	31
5. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ .....	37
6. ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ .....	41
6.1. Перечень вопросов.....	41
6.2. Структура билета.....	43
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА по БРС.....	44
8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	49

## ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов является частью учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие профессиональные навыки будущего специалиста, такие как: внутренняя готовность к самообразованию в профессиональной сфере, самостоятельность, инициативность и ответственность, умение работать с источниками информации.

Каждая дисциплина должна иметь методическое сопровождение по самостоятельному изучению разделов и тем, указанных в рабочей программе, по написанию рефератов, выполнению расчетно-графических и лабораторных работ. В связи с этим эффективная организация самостоятельной работы студентов требует проведения целого ряда мероприятий, создающих предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы, а именно:

- обеспечение студентов информационными ресурсами (учебными пособиями, справочниками, банками индивидуальных заданий);
- обеспечение студентов методическими материалами (учебно-методическими практикумами, сборниками задач, указаниями по выполнению лабораторных работ);
- наличие материальных ресурсов (ПК, измерительного и технологического оборудования для выполнения заданий в рамках НИР и ГПО);
- организация консультаций преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и практических результатов, полученных студентом самостоятельно при выполнении НИРС и ГПО (конференции, олимпиады, конкурсы).

Важным элементом в организации самостоятельной работы студентов является контроль. Контроль требует разработки преподавателем контролирующих материалов в текстовом или тестовом исполнении, а при использовании ПК - пакета прикладных программ для проверки знаний студентов. Эффективная система контроля (в т.ч. электронная система контроля), наряду с рейтинговой системой оценки знаний, позволит добиться систематической самостоятельной работы студентов над учебными материалами и повысить качество обучения.

Пособие разработано по дисциплине “Многоволновые оптические системы связи” в соответствии с временными рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобрнауки РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения технических вузов старших курсов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи,

# 1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цели преподавания дисциплины.

Дисциплина «Многоволновые оптические системы связи» относится к вариативной части цикла дисциплин, читаемых для студентов направлению подготовки 11.03.02 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи, и является дисциплиной по выбору, устанавливаемой ВУЗом.

Целью преподавания дисциплины преподавания дисциплины является изучение принципов построения, организации и компонентой базы многоволновых оптических система связи, ознакомление с их техническими характеристиками и перспективами развития оборудования оптических цифровых систем связи

## 1.2. Задачи изучения дисциплины.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- изучение принципов построения волоконно-оптических систем связи со спектральным уплотнением;
- изучение физических основ функционирования активных и пассивных компонент оборудования многоволновых оптических система связи ;
- изучение характеристик и стандартов пассивных (мультиплексоров, демультиплексоров) и активных (оптических усилителей, источников излучения) компонент..

## 1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин.

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения следующих дисциплин: «Основы физической и квантовой оптики», «Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)», «Оптические цифровые телекоммуникационные системы», «Сети связи и системы коммутации».

## 1.4 Объем дисциплины и виды учебной работы.

Вид обучения	Очное (8 семестр)	Заочное (8,9 семестры)
Вид учебной работы	Всего часов	
Общая трудоемкость дисциплины	108	108
Лекции	24	2;8 (8,9 сем)
Лабораторные занятия	18	12 (9 сем)

Кол-во контрольных работ	4	1
Самостоятельная работа	66	82
Вид итогового контроля	зачет (8 сем.)	зачет (9 сем.)

### 1.5 САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Самостоятельная работа студентов предполагает углубленное изучение разделов дисциплины, которые связаны с выполнением лабораторных занятий, контрольных работ, подготовку рефератов и самостоятельное освоение ряда теоретических вопросов при подготовке к сдаче экзамена.

№ п/п	Наименование работ	Кол-во часов	Форма контроля
1.	Проработка лекционного материала	20	Опрос, тестовые контрольные работы
2.	Подготовка к лабораторным работам и выполнение отчетов	16	Допуск к лаб. работам. Защита отчетов
3.	Подготовка к контрольным работам	8	Проверка контрольных работ, оценка качества выполненных работ
4.	Выполнение индивидуальных творческих заданий (рефераты)	6	Защита реферата
5.	Подготовка к практическим занятиям	6	Опрос. Проверка конспектов самостоятельного изучения
6.	Подготовка к зачету	10	Сдача экзамена
	<b>Всего часов</b>	<b>66</b>	

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

### Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекции	Лаборат. занятия	Самост. Раб.	Всего час. (без экзам)
1.	Введение. Классификация многоволновых оптических систем связи	2		4	6
2.	Методы уплотнения информационных потоков	4		6	10
3.	Общая структура и параметры много-	4		6	10

	волновых оптических систем связи				
4.	Стандарты на системы, оборудование и компоненты волнового уплотнения	4	6	16	26
5.	Характеристики компонент оптических систем волнового уплотнения	4	6	16	26
6.	Устройства и компоненты WDM, DWDM, CWDM оптических систем связи	4	6	16	26
7	Перспективы развития многоволновых оптических систем связи	2		2	4
	ВСЕГО	24	18	66	108

## 2.1 Разделы лекционного курса.

### 2.1.1 Введение (2 час).

Предмет и задачи курса. История развития многоволновых ВОСП. Классификация многоволновых оптических систем связи. Мировой уровень развития оптической связи с использованием WDM

*Методические указания.* В качестве литературы можно рекомендовать и [1,2,6].

### 2.1.2. Методы уплотнения информационных потоков (4 час.)

Метод временного уплотнения. Метод частотного уплотнения. Модовое уплотнение. Уплотнение по поляризации. Многоволновое уплотнение оптических несущих. Оптическое временное уплотнение. Методы уплотнения каналов по полярности Сравнительная характеристика, области использования, перспективы.

*Методические указания.* В качестве литературы можно рекомендовать [7].

### 2.1.3. Общая структура и параметры оптических систем волнового уплотнения (4 час.)

Общие принципы построения, описание и структура цифровых WDM систем. Общее описание и параметры CWDM, DWDM, HDWDM систем. Критерии обеспечения требуемых характеристик. Определение запаса по мощности. Оценка энергетического бюджета

*Методические указания.* В качестве литературы можно рекомендовать и [1,2,6].

### 2.1.4. Стандарты на системы, оборудование и компоненты волнового уплотнения (4 час.)

Стандарты Международного телекоммуникационного союза ITU на применение технологий и оборудования, Международной электротехнической комиссии IEC для оборудования SDH/SONET оптических цифровых систем передачи. Частотный план, стандартизованный ITU-T. Рекомендации ITU-T

G.mcs на оптические интерфейсы для многоканальных систем и IEC 6129x для оптических волокон, пассивных и активных компонент оборудования WDM..

**Методические указания.** При изучении стандартов ITU на частотные планы и оптические интерфейсы компонент WDM оборудования необходимо воспользоваться [1,2, 7-10].

### **2.1.5 Характеристики компонент оптических систем волнового уплотнения (4 час.)**

Передатчики – выходная мощность, стабильность центральной частоты, спектр и боковые лепестки излучения. Методы модуляции – внутренняя и внешняя . Методы стабилизации длины волны..

Оптическое волокно – хроматическая дисперсия, поляриза-ционная мо-довая дисперсия; нелинейные эффекты.

Мультиплексоры и демультиплексоры – число каналов, полоса пропуска-ния, центральная частота и межканальный интервал, изоляция и дальние пере-ходные помехи, неравномерность распределения потерь по каналам; поляриза-ционные явления. направленность .

Оптические усилители - спектральная зависимость и равно-мерность ко-эффициента усиления, коэффициент усиления слабых сигналов и перекрестно-го насыщения, выходная мощность насыщения, шумовые параметры.

**Методические указания.** Очень важно знать определения основных ха-рактеристик компонент оптических систем волнового уплотнения, их количе-ственные значения. Указанные вопросы хорошо изложены в [2,7,9].

### **2.1.6 Устройства и компоненты волнового уплотнения WDM (4 час.)**

Волоконно-оптические фильтры. Оптические усилители. Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов. Устройства оптической кросс-коммутации. Волновые разветвители. Устройства компенсации дисперсии Вол-новодные оптические компоненты спектрального мультиплексирования /демультиплексирования.

Мониторинг и тестирование оборудования оптических систем связи

**Методические указания.** Физические основы построения, структурные схемы и основные характеристики оптических усилителей хорошо изложены в [2,5,8]. При изучении обратить внимание на способы уменьшения неравномер-ности коэффициента усиления и расширение полосы частот усилителей [2].

При изучении обратить внимание на планарные и объемные технологии при реализации интегрированных оптоэлектронных модулей . Основные прин-ципы интеграции оптических компонент (усилителей, транспондеров, мульти-плексоров) изложены в [5,7].

Вопросы тестирования и измерения характеристик компонент оптиче-ских систем со спектральным уплотнением, а также требования нормативных документов изложены хорошо изложены в [8-10].

### **2.1.7 Перспективы развития мноволновых оптических систем связи (2 час).**



Перспективы развития многоволновых оптических систем связи

**Методические указания.** Основные тенденции развития многоволновых оптических систем связи можно найти в монографии [8].

Формой отчетности по разделам самостоятельной работы является реферат, реферат-доклад или презентация. Объем реферата от 10 до 25 печатных страниц. Рекомендации по составлению реферата даны в Приложении А, а рекомендации по оформлению слайдов презентаций - в Приложении Б.

При оценке вашего труда преподавателя интересует:

- соответствие содержания выбранной теме;
- глубина проработки материала;
- правильность и полнота использования источников;
- оформление реферата.

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**Основными целями** проведения и выполнения лабораторного практикума являются :

- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины «Многоволновые оптические системы связи»;
- изучение особенностей строения, состояния, поведения и функционирования оптических элементов мультиплексорного оборудования
- освоение приемов, методов и способов выявления, наблюдения, измерения и контроля основных параметров и характеристик оптических мультиплексоров и усилителей;
- усвоение приемов, методов и способов обработки, представления и интерпретации результатов проведенных исследований.

При выполнении лабораторных работ студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- знакомство с учебно-методической и дополнительной литературой по заданной теме.

**Список компьютерных лабораторных работ (ЛР) для студентов очной формы:**

1. Исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей;
2. Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро;
3. Исследование оптических демультиплексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале
4. Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG).

Продолжительность каждой работы - 4 час..

### **Список компьютерных лабораторных работ для студентов заочной формы:**

1. Исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей;
2. Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG).

### **Порядок выполнения лабораторных работ**

1. Получить вариант для выполнения лабораторной работы у преподавателя.
2. Выполнить расчётное задание, согласно своему варианту.
3. Ознакомится с руководством пользователя по работе с приложением по моделированию.
4. Запустить приложение.
5. Пройти тест-контроль.
6. Выполнить пункты экспериментального задания, согласно своему варианту.
7. Оформить отчёт о проделанной лабораторной работе в приложении MS Word.

### **Содержание отчета**

Отчет о проделанной работе должен содержать следующие разделы:

- Цель работы;
- Краткая теория ;
- Результаты работы – расчеты и графики с краткими пояснениями полученных зависимостей;
- Выводы по проделанной работе.

**Методические указания** к компьютерным лабораторным работам и программное обеспечение для их выполнения представлены в локальной сети кафедры СВЧиКР в разделе с материалами учебно-методического комплекса по дисциплине МООЦСС (S:\ШаранговичСН\УМК МОСС 11.03.02) , соответствующие учебно-методические пособия находятся в библиотеке ТУСУР [4,17-20] и размещены на электронном образовательном портале ТУСУРа (URL: <http://edu.tusur.ru/>).

Программное обеспечение (программы) выполнено в среде разработки DELPHI 7.0 и зарегистрировано в Отраслевом фонде алгоритмов и программ [21-24]. Программы могут быть использованы как одним пользователем **для самостоятельного выполнения ЛР**, так и для использования в учебной аудитории при множественном одновременном доступе.

Оболочка моделирования каждой работы построена по модальному принципу и предусматривает последовательное разворачивание справочных, расчетных и графических окон. При этом предусмотрена регистрация студента и преподавателя для заполнения форм отчета, генерируемого по окончании работы в MS Word. Также можно выбрать вариант и номер стартового пункта работы. Каждая работа содержит 15 вариантов заданий по 7 пунктов. Для осу-

ществления допуска предусмотрен автоматический тестовый контроль, выполняемый в отдельном окне.

По результатам расчета заполняются таблицы с информацией, требуемой в задании к выполняемому пункту. После выполнения пункта программа строит необходимые графики в отдельном окне, где также есть возможность для записи выводов по проделанному пункту и перехода к выполнению следующего пункта.

При возвращении к выполнению пункта, который был уже сделан, данные в таблицах с информацией, требуемой в задании к этому пункту, и выводы по нему сохраняются в последней редакции исполнителя. В конце работы генерируется отчет со всей необходимой информацией о выполнении работы.

### **3.1. Программы выполнения компьютерных лабораторных работ**

#### **Лабораторная работа №1 Компьютерное исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей**

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров оптических многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей с использованием программного обеспечения [23].

#### **Рекомендации по выполнению работы**

При выполнении лабораторных работ к исследованию рекомендуются следующие структурные схемы усилителей:

- усилитель мощности с обратной схемой накачки
- линейный усилитель с прямой схемой накачки.

#### **Экспериментальное задание**

**Для каждого типа усилителя необходимо:**

1. Исследовать зависимость оптимальной длины  $L_{opt}$  и максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности сигнала  $P_s$  в диапазоне от 0.001мВт до 0,5мВт для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм. ( $P_p$  и  $\lambda_s$  задаются вариантом задания)
2. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности накачки  $P_p$  в диапазоне от 100 до 300мВт, для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $P_s$  и  $\lambda_s$  задаются вариантом задания)
3. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от длины волны сигнала  $\lambda_s$  в диапазоне 1530 нм – 1560 нм для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $P_s$  и  $P_p$  задаются вариантом задания)
4. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от температуры в диапазоне от  $-20$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , для  $\lambda_p=1480$ нм и  $\lambda_p=980$ нм. ( $\lambda_s$ ,  $P_s$  и  $P_p$  задаются вариантом задания)

5. Исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  первого канала от количества каналов при равных входных мощностях каждого канала для  $\lambda_p=1480\text{nm}$  и  $\lambda_p=980\text{nm}$ . ( $P_s$ ,  $\lambda_s$ ,  $\Delta\lambda$ , и  $P_p$  задаются вариантом задания)
6. Для многоканального усилителя исследовать зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  первого канала от межканального интервала по длине волны  $\Delta\lambda$  от 0.4nm до 1.6nm ( $\lambda_s$ ,  $P_s$  и  $P_p$ , количество каналов задаются вариантом задания).
7. Для многоканального усилителя при равных мощностях входных сигналов определить оптимальную длину усилителя (все параметры задаются вариантом задания). Установить фильтр для выравнивания АЧХ. Использовать фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохранить следующие графики:
  - график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
  - график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;
  - график с зависимостью мощности сигнала в каждом канале от длины волокна при оптимальной длине волокна.

Определить неравномерность АЧХ усилителя и АЧХ усилителя с фильтром.

8. Для многоканального усилителя при неравных мощностях входных сигналов определить оптимальную длину усилителя (все параметры задаются вариантом задания). Установить фильтр для выравнивания выходной мощности. Использовать фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохранить следующие графики:
  - график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
  - график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;
  - график с зависимостью мощности сигнала в каждом канале от длины волокна при оптимальной длине волокна.

Определить неравномерность выходной характеристики усилителя без фильтра и с фильтрами.

Для каждого варианта данные для выполнения работы задаются из таблицы 2.1.

№ варианта	Тип усилителя	$P_s$ , mW	$\lambda_s$ , nm	$P_p$ , mW	$n$	$\Delta\lambda$ , nm
1	линейный	0.01	1520	250	16	1.6
2	мощности	0.001	1530	200	24	0.4
3	линейный	0.005	1535	280	16	0.8
4	мощности	0.002	1525	250	24	0.8
5	линейный	0.02	1540	270	8	1.6

6	мощности	0.05	1550	300	8	1.2
7	мощности	0.01	1560	290	8	0.8
8	линейный	0.001	1555	250	8	0.4
9	мощности	0.005	1520	200	16	0.8
10	линейный	0.002	1530	280	24	0.8
11	мощности	0.02	1535	250	16	0.4
12	линейный	0.05	1525	270	16	1.2
13	линейный	0.01	1540	300	16	0.8
14	мощности	0.001	1550	250	8	1.6
15	линейный	0.005	1560	200	8	0.4
16	мощности	0.002	1555	280	24	0.4
17	линейный	0.02	1520	250	24	0.4
18	мощности	0.05	1530	270	16	0.8
19	мощности	0.01	1535	300	24	0.4
20	линейный	0.001	1525	300	24	0.4

## Лабораторная работа №2 компьютерное исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перо

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров оптических мультиплексоров на основе интерференционных и Фабри-Перо фильтров с использованием программного обеспечения [22].

### Рекомендации по выполнению работы

#### Расчётное задание

1. Согласно своему варианту задания, из таблицы 1 получить исходные данные для расчёта демультиплексора.
2. По таблице ИТУ-Т найти число каналов  $n$  и центральные частоты  $\lambda_i$ .

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон длин волн*	1528,77 нм – 1532,68 нм	1528,77 нм – 1536,61 нм	1546,12 нм – 1554,13 нм	1539,77 нм – 1549,32 нм	1535,82 нм – 1538,98 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)**	20	22	25	26	22
Тип [И.Ф]***	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.
$n_j$ [И.Ф]****	1.458	1.56	1.55	1.458	1.51

Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон длин волн*	1549,32 нм – 1553,33 нм	1533,47 нм – 1542,94 нм	1546,12 нм – 1554,13 нм	1535,04 нм – 1557,36 нм	1530,33 нм – 1536,61 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)**	21	19	25	18	24
Тип [И.Ф]***	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.
$n_l$ [И.Ф]****	1.5	1.458	1.59	1.52	1.458

Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон длин волн*	1550,92 нм – 1554,13 нм	1550,92 нм – 1560,61 нм	1533,47 нм – 1557,36 нм	1533,47 нм – 1557,36 нм	1541,35 нм – 1550,92 нм
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	600	1000	200
$P_0$ (Дб)**	23	20	18	19	24
Тип [И.Ф]***	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]****	1.557	1.533	1.458	1.55	1.565

- \* – центральные максимумы первого и последнего канала;
- \*\* – уровень переходных помех, который должен обеспечивать демультимплексор.
- \*\*\* – тип демультимплексора, построенного на интерференционных фильтрах: **И.М-Ц** – Интерферометр Маха-Цендера, **Р.Ф.П.** – резонатор Фабри-Перро, **В.Р.** – волоконная решётка;
- \*\*\*\* – значение показателя преломления  $n_l$  для демультимплексора построенного на интерференционных фильтрах.

### Расчет оптического демультимплексора, на основе интерференционного фильтра.

1. Определить угол падения светового пучка на фильтр, исходя из данной в задании схемы построения демультимплексора.
2. Рассчитать период структуры для всех тонкоплёночных фильтров, входящих в демультимплексор и толщину фильтров для  $\Delta n = 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ . Толщину всех фильтров считать постоянной, равной толщине центрального фильтра. Результаты расчёта для всех  $\Delta n$  занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$\Delta_{TF,i}$				
$L_{TF}$				

### Расчет оптического демультимплексора, на основе фильтров Фабри-

## Перро.

1. Найти показатели преломления среды резонатора для каждого фильтра.
2. Оценить значение коэффициента отражения зеркал.
3. Оценить значение длины резонатора для центрального фильтра демультимплексора настроенного на отражение спектра с максимальной центральной длиной волны. Это значение будем считать постоянным для всех фильтров демультимплексора. Оно равно длине последнего фильтра. Все результаты расчёта занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP}$				
$L_{FP}$				

## Экспериментальное задание

Занести в расчётную программу количества каналов демультимплексора и центральные частоты, отражаемые фильтрами

## Исследование оптического демультимплексора, на основе интерференционного фильтра.

1. Исследовать зависимость максимальных переходных помех ( $P_{max}$ ) от  $\Delta n$ . Для этого необходимо определить переходные помехи демультимплексора, при различных значениях  $\Delta n$ , вычисленных в расчётном задании (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Результаты занести в таблицу:

Параметр / $\Delta n$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_{max}$				

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(\Delta n)$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультимплексоров и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $\Delta n$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах.

2. Найти оптимальную разницу показателей преломления, при которой максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации зависимости  $P_{max}(\Delta n)$  найдите такой  $\Delta n$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим его как  $\Delta n_{opt}$ .
3. Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $\Delta n_{opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультимплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр /	1	2	...	n
------------	---	---	-----	---

<b>№ фильтра</b>				
$\lambda_i$				
$\Delta n_{opt i}$				
$\Delta_{TF}$				
$L_{TF, int(n/2)}$				
$\Delta\lambda$ (нм)				
$P_i$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

- Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

### Исследование оптического демультиплексора, на основе фильтров Фабри-Перро.

- Исследовать зависимость переходных помех от коэффициента отражения зеркал. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для двух центральных соседних каналов (каналы с номерами  $int(n/2)$  и  $int(n/2)+1$ ) при  $R_{FP} = 0.9, 0.95$  и  $0.99$ . Для каждого коэффициента отражения рассчитать длину резонатора. Значение  $\Delta\lambda'_{FSR}$  при этом будет равно:  $\Delta\lambda'_{FSR} = \Delta\lambda_{FSR} + (1-R)^2$ , где  $\Delta\lambda_{FSR}$  в микрометрах. Перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ . Результаты занести в таблицу:

<b>Параметр / <math>R_{FP}</math></b>	<b>0.90</b>	<b>0.95</b>	<b>0.99</b>
$\Delta\lambda$ (нм)			
$L_{FP}$ (мкм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(R_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для двух исследуемых каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $R$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с номерами  $int(n/2)$  и  $int(n/2)+1$ .

- Найти оптимальный коэффициент отражения зеркал, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(R_{FP})$  найдите такой  $R_{FP}$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{max}(R_{FP}) = P_0 \pm 1$  дБ. Обозначим его как  $R_{FP, opt}$ .
- Исследовать зависимость переходных помех от длины резонатора. Для этого необходимо определить переходные помехи демультиплексора для первого и последнего канала при  $L_{FP} = L_{FP, расчётное}, L_{FP, расчётное} - 10\%$  и  $L_{FP, расчётное} +$



10%<sub>e</sub> (перед расчётом  $P$ , необходимо определить  $\Delta\lambda$ ). Коэффициент отражения зеркал для всех  $L_{FP}$  будет  $R_{FP, opt}$ . Результаты занести в таблицу:

Параметр / $L_{FP}$	$L_{FP, расчётное}$	$L_{FP, расчётное} - 10\%$	$L_{FP, расчётное} + 10\%$
$\Delta\lambda$ (нм)			
$P_{max}$			

По таблице постройте зависимость  $P_{max}(L_{FP})$ . В отчёте, так же отобразите полученные графики аппаратных функции демультиплексоров (только для первого и последнего каналов) и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $L_{FP}$ . Объясните, чем вызвано различие в переходных помехах и почему были взяты каналы с первым и последним номерами.

- Найти оптимальную длину резонатора для последнего фильтра, при котором максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_{0\pm 1\text{дБ}}$ . Для этого, необходимо, на основе аппроксимации (либо экстраполяции) зависимости  $P_{max}(L_{FP})$  найдите такую  $L_{FP}$ , которая удовлетворяла бы уравнению  $P_{max}(L_{FP})=P_{0\pm 1\text{дБ}}$ . Обозначим её как  $L_{FP, opt}$ .
- Рассчитать конструкционные параметры фильтров, при  $R_{FP, opt}$  и  $L_{FP, opt}$ . На основе полученных параметров смоделировать аппаратную функцию демультиплексора и рассчитать переходные помехи. Результаты занести в таблицу:

Параметр/ № фильтра	1	2	...	n
$\lambda_i$				
$n$				
$R_{FP, opt}$				
$L_{FP, opt}$				

В отчёте отобразите смоделированный график аппаратной функции демультиплексора и рассчитанный график переходных помех. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.

- Для демультиплексора с оптимальными параметрами, пронаблюдать влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Объясните, чем вызван полученный вид зависимости переходных помех от номера канала.
- Сравнить переходные помехи обоих демультиплексоров. Сделать выводы о возможности практического построения демультиплексора на интерференционных фильтрах и фильтрах Фабри-Перро, удовлетворяющих требованиям нормативных документов [9,10].

### Лабораторная работа №3 Компьютерное исследование оптических демультиплексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров оптического демультиплексора на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале с использованием программного обеспечения [24].

### Рекомендации по выполнению работы

#### Расчётное задание

1. Согласно своему варианту задания, из таблицы исходных данных по таблице ITU-T (приложение) найти число каналов (решёток)  $n$  и центральные частоты  $\lambda_i$ .

Таблица – Исходные данные для выполнения работы

Параметр	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон * (нм)	1528,77 – 1532,68	1528,77 – 1536,61	1546,12 – 1554,13	1539,77– 1549,32	1535,82 – 1538,98
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)	25	22	25	26	22
Параметр	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон * (нм)	1549,32 – 1553,33	1533,47– 1542,94	1546,12 – 1554,13	1535,04 – 1557,36	1530,33 – 1536,61
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)	21	19	25	18	24
Параметр	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон * (нм)	1550,92 – 1554,13	1550,92– 1560,61	1533,47– 1557,36	1533,47– 1557,36	1541,35– 1550,92
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	100	200
$P_0$ (Дб)	23	20	18	19	24

\* – центральные максимумы первого и последнего канала;

2. Оценить изменение угла наклона ФПМ ( $\Delta\Psi$ ) исходя из отношения  $\Delta\Psi = (160^\circ - 2 \cdot \theta)/n$ .
3. Оценить толщину ФПМ ( $d$ ), необходимую для достижения заданной селективности, исходя из выражений (2.24) и (2.25).
4. Найти углы  $\theta_i$  под которым будут дифрагировать лучи с длинами волн  $\lambda_i$  исходя из выражения (2.21).
5. Оценить теоретически максимальную достижимую дифракционную эффективность голограмм по формуле (2.20).

#### Экспериментальное задание.

1. Занести в программу параметры демультиплексора исходя из таблицы исходных данных и материальные параметры ФПМ:  $\delta_{ni}=10^{-3}$ ,  $\delta_{np}=10^{-2}$ ,  $s=1$ ,  $D=1 \cdot 10^{-15}$ ,  $n=1.45$ . Шаг углов наклона и толщина ФПМ находится из расчётного задания. Длину волны и угол записи взять из таблицы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
$\lambda_{зап}$ (нм); $\theta_{зап}$ (град);	640 20	680 15	700 10	750 12	800 15
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
$\lambda_{зап}$ (нм); $\theta_{зап}$ (град);	850 10	900 15	950 20	630 10	1100 18
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
$\lambda_{зап}$ (нм); $\theta_{зап}$ (град);	730 13	990 15	620 12	785 13	700 10

2. Определить максимально достижимую дифракционную эффективность  $\eta_{d \max}$  для наложенных голограмм при отсутствии оптического затухания. Для этого необходимо определить такую дифракционную эффективность, при которой максимум кривой динамики записи последней голограммы проходил бы через  $\eta_{d \max}$ . Занести в таблицу получившиеся времена записи для каждой голограммы и максимумы относительной брэгговской расстройки  $\Delta_i$ ;

№ голограммы	Время записи, сек	$\Delta_i$

3. Исследовать зависимость дифракционной эффективности от относительной брэгговской расстройки  $Kd(\Delta)$ . Пронаблюдать изменения суммарных переходных помех на каждый канал и соответствие их требуемым нормам (P0). Для этого, переходные помехи перевести в децибелы и отразить в отчёте в виде таблиц и графиков. Если переходная помеха слишком большая, необходимо увеличить толщину ФПМ и повторить пункт 2 заново.
4. Повторить пункты 2-3, для оптического затухания в 3 Нэп. Сделать выводы о влиянии оптического затухания в ФПМ на динамику записи голограмм и дифракционные характеристики.
5. Сделать выводы по использованию оптического демультиплексора на основе наложенных дифракционных решёток записанных в ФПМ, как устройства селекции каналов в ВОСП. Выявить достоинства, недостатки и провести сравнительный анализ исследуемого демультиплексора, по сравнению с исследуемыми ранее демультиплексорами.

#### Лабораторная работа №4 Компьютерное исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG)

**Цель работы:** изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов (AWG) с использованием программного обеспечения [21].

## Рекомендации по выполнению работы

### Расчетное задание

Для выполнения лабораторных работ необходимо рассчитать основные конструктивные параметры демультимплексора AWG ( $\lambda_0$ ,  $d_w$ ;  $K$ ,  $L_f$ ;  $\alpha$ ;  $m$ ,  $\Delta l$ ). Данные параметры могут быть рассчитаны по формулам из п 2.3.

Исходные данные для выполнения работы берутся из табл.2.1 согласно определенного преподавателем варианта.

Таблица 2.1 – Исходные данные для выполнения работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон:	192,1 ТГц – 194,6 ТГц	194,1 ТГц – 196,1 ТГц	192,5 ТГц – 196,1 ТГц	192,1 ТГц – 196,1 ТГц	192,9 ТГц – 195,9 ТГц
Кан. интервал ГГц:	100	200	100	200	100
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон:	193,7 ТГц – 195,3 ТГц	192,2 ТГц – 195,4 ТГц	192,5 ТГц – 195,7 ТГц	193,6 ТГц – 195,7 ТГц	193,5 ТГц – 192,7 ТГц
Кан. интервал (ГГц):	50	100	100	50	100
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон:	195,2 ТГц – 196,9 ТГц	194,5 ТГц – 196,5 ТГц	194,7 ТГц – 196,3 ТГц	195,2 ТГц – 196,8 ТГц	193,1 ТГц – 196,7 ТГц
Кан. интервал (ГГц):	100	100	100	200	100

Внешние параметры:  $\omega_i = \omega_g = \omega_0 = 7.16$  мкм.

Материальные параметры:  $n_c = 1.454$ ,  $n_0 = 1.451$ ,  $n_s = 1.453$ .

Далее необходимо ввести данные параметры в соответствующие поля программного обеспечения.

### Экспериментальное задание

#### 1 Исследовать одиночный канал

1.1 Выбрать произвольный канал (например центральный канал 0), в соответствии с описанием ПО.

1.2 Определить неоднородность вносимых потерь одного канала.

1.3 Найти полосу пропускания одного канала на уровне -3 и -20дБ.

1.4 Исследовать зависимость вносимых потерь от длины волны канала.

**2. На одной из частот оптического диапазона исследовать влияние конструктивных параметров ( $K$ ,  $d_w$ ,  $L_f$ ,  $m$ ) на:**

- коэффициент передачи;

- положение выходного порта d0;

- полосу пропускания на уровне -20 дБ.

2.1 Исследовать влияние  $K$  на вышеизложенные параметры.

2.2 Исследовать влияние  $d_w$  на вышеизложенные параметры.

2.3 Исследовать влияние  $L_f$  на вышеизложенные параметры.

2.4 Исследовать влияние  $m$  на вышеизложенные параметры.

**3. Исследовать совокупность каналов**

3.1 Привести суммарное поле на выходе, определить положение выходных портов.

3.2 Исследовать зависимость переходных помех от номера каналов.

### 3.2. Пример выполнения лабораторной работы

**1. Компьютерное моделирование многоволнового эрбиевого волоконно-оптического усилителя**

**2. Исходные данные**

Согласно варианту задания выбираются исходные данные:

№ варианта	Тип усилителя	$P_s$ , mW	$\lambda_s$ , nm	$P_p$ , mW	$n$	$\Delta\lambda$ , nm
7	мощности	0,01	1560	290	8	0,8

### 3. Компьютерное моделирование

В данной лабораторной работе исследуется линейный усилитель с обратной схемой накачки.

**3.1 Исследование зависимости оптимальной длины  $L_{opt}$  и максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности сигнала  $P_s$  в диапазоне от 0,001 мВт до 0,5 мВт для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм ( $\lambda_s=1580$  нм,  $P_p=290$  мВт).**

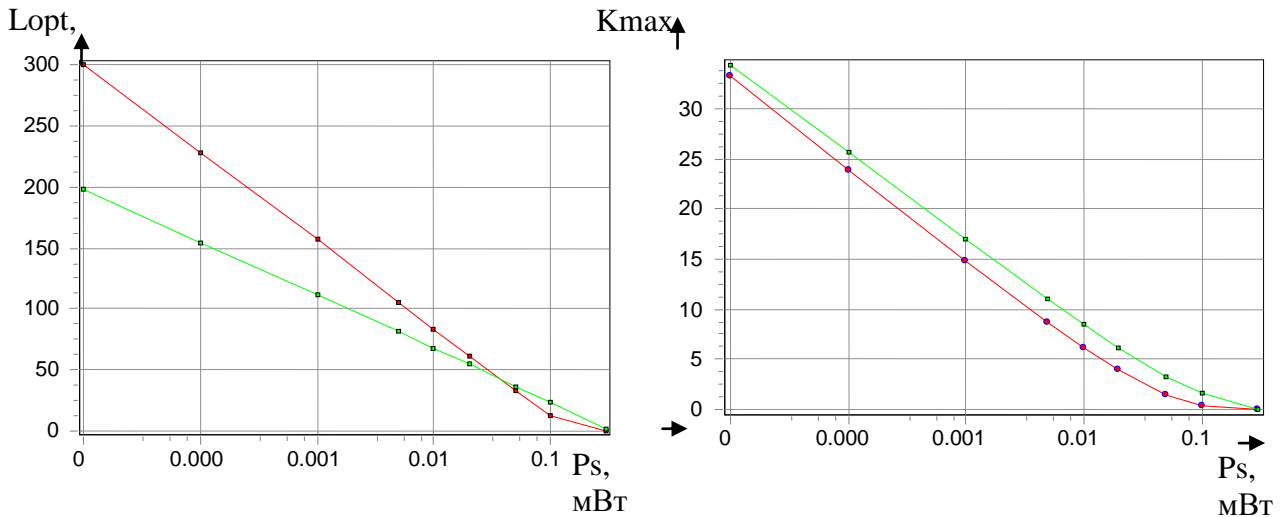


Рисунок 3.1.1 - Зависимость  $L_{opt}(P_s)$  и  $K_{max}(P_s)$

Выводы по пункту 3.1:

Оптимальная длина усилителя  $L_{opt}$  уменьшается с ростом мощности входного сигнала  $P_s$  (рис. 3.1.1 слева). Это объясняется тем, что при больших мощностях входного сигнала усиление до максимального значения происходит на более коротком участке волокна.

Коэффициент усиления  $K_{max}$  уменьшается с ростом мощности входного сигнала  $P_s$  (см. рис. 3.1.1 справа). Это объясняется следующим образом. Число возбуждаемых атомов эрбия пропорционально мощности входного сигнала  $P_s$ , но это число конечно в силу ограниченности количества ионов эрбия, так что увеличение  $P_s$  в конечном итоге приводит к насыщению усилителя и, как следствие, спаду коэффициента усиления  $K_{max}$ .

Диапазон накачки  $\lambda_p = 0.98$  мкм. EDFA накачиваемые в этом диапазоне, обладают наибольшей эффективностью накачки. Эти свойства связаны с большим сечением поглощения и полным отсутствием стимулированного излучения и поглощения возбужденным состоянием  $4I13/2$  на длине волны накачки.

### 3.2. Исследование зависимости максимального коэффициента усиления $K_{max}$ от мощности накачки $P_p$ в диапазоне от 100 до 300 мВт, для $\lambda_p=1480$ нм и $\lambda_p=980$ нм ( $P_s=0.01$ мВт, $\lambda_s=1560$ нм).

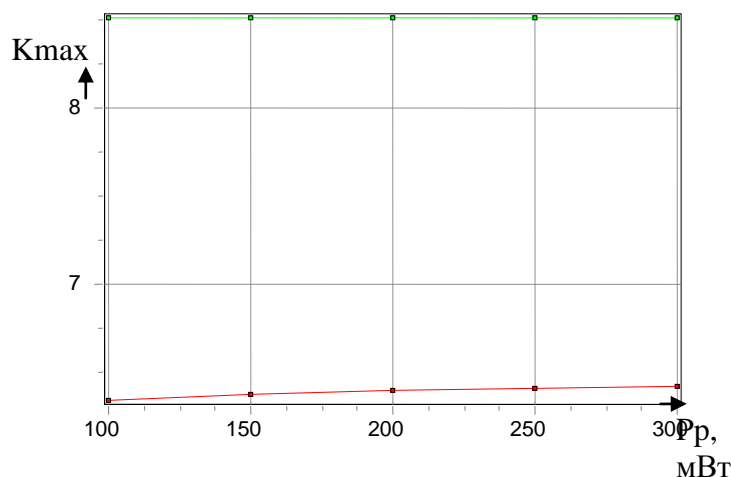


Рисунок 3.2.1 - Зависимость  $G_{max}(P_p)$

Выводы по пункту 2:

Коэффициент усиления  $K_{\max}$  увеличивается с ростом мощности накачки  $P_p$  (см. рис. 3.2.1). Это результат того, что при росте  $P_p$  возрастает заселенность метастабильного уровня возбужденными атомами эрбия, что в свою очередь способствует увеличению числа вынужденных переходов и, как следствие последнего, возрастает коэффициент усиления.  $K_{\max}$  достигнет порога при достижении мощностью накачки насыщения.

**3.3. Исследование зависимости  $K_{\max}$  от длины волны сигнала  $\lambda_s$  в диапазоне 1530 нм – 1560 нм для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм ( $P_s=0.01$  мВт,  $P_p=290$  мВт).**

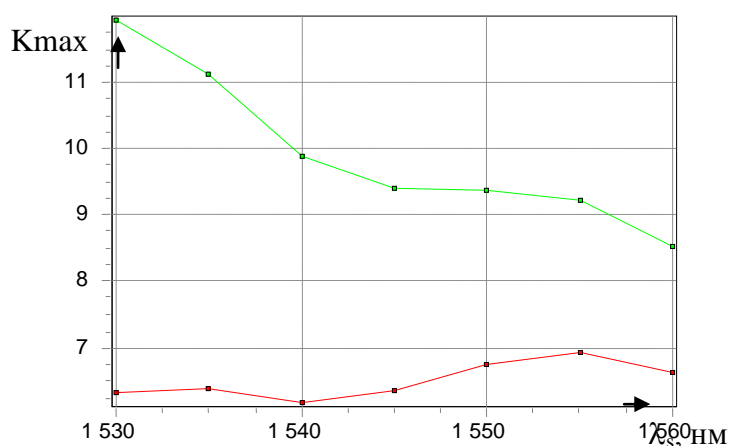


Рисунок 3.3.1 - Зависимость  $K_{\max}(\lambda_s)$

Выводы по пункту 3:

Коэффициент усиления  $K_{\max}$  уменьшается с ростом длины волны информационного сигнала (см. рис. 3.3.1). Это объясняется ограниченностью рабочей полосы усиления EDFA, максимум которой соответствует длине волны 1530 нм.

Характер этой зависимости обусловлен тем, что уход от центральной длины волны излучательного перехода электрона с одного энергетического уровня на другой (под центральной длиной волны здесь понимается длина волны спектра излучения мощность излучения для которой максимальна, а присутствие вместо одной длины волны целого спектра излучения объясняется наличием некоего диапазона энергетический состояний каждого уровня) резко снижает эффективность излучения на данной длине волны, а следовательно и эффективность усилителя в целом.

**3.4 Исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{\max}$  от температуры в диапазоне от -20 до +40 0С, для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм ( $P_s=0,01$  мВт,  $\lambda_s=1560$  нм,  $P_p=290$  мВт).**

$K_{\max}$

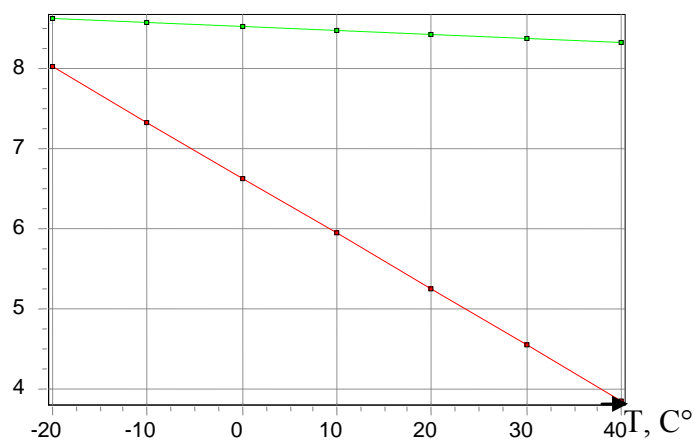


Рисунок 3.4.1 - Зависимость  $K_{max}(T)$

Выводы по пункту 4:

Коэффициент усиления  $G_{max}$  уменьшается с ростом температуры  $T$  (см. рис.3.4.1) Это результат изменения инверсии населённости.

Изменение  $K_{max}(T)$  для накачки на длине волны 1480 нм более значительны, чем соответствующие изменения для 980 нм. Малому изменению коэффициента усиления  $K_{max}$  в диапазоне температур способствует меньшее влияние температуры на вероятность переходов в трёхуровневой системе, соответствующей накачке на длине волны 980 нм.

Исследование температурной зависимости коэффициента усиления показало ее линейность в данном температурном диапазоне. Так же из полученных графиков следует сделать вывод о предпочтении накачки с длиной волны 980нм, в силу того что при ней температурная стабильность работы усилителя гораздо выше, нежели на длине волны 1480нм.

**3.5. Исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  первого канала от количества каналов при равных входных мощностях каждого канала для  $\lambda_p=1480$  нм и  $\lambda_p=980$  нм ( $P_s=0.01$  мВт,  $\lambda_s=1560$  нм,  $P_p=290$  мВт,  $\Delta\lambda=0.8$  нм).**

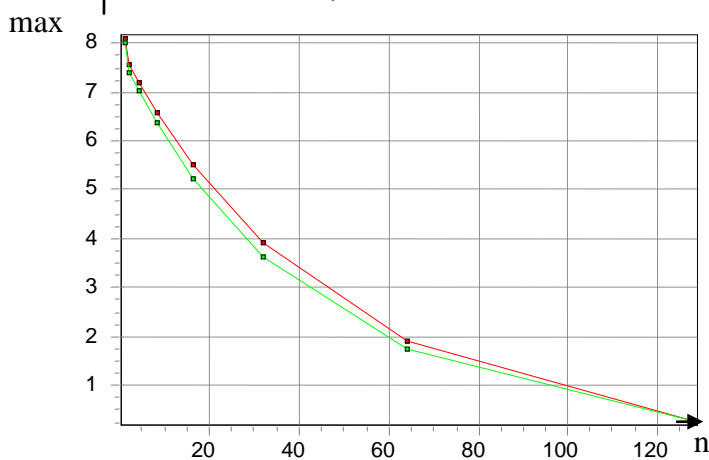


Рисунок 3.5.1 - Зависимость  $K_{max}(n)$ , количество каналов)

Выводы по пункту 5:

Коэффициент усиления  $K_{max}$  уменьшается с ростом числа каналов  $n$  (см.



рис. 3.5.1). Это объясняется равномерным распределением мощности накачки между возрастающим числом каналов.

Снятая зависимость максимального коэффициента усиления первого канала от числа каналов, при распределении мощности накачки между каналами, показывает, что достижение необходимого коэффициента усиления каждого из каналов накладывает жесткое ограничение на их количество.

### 3.6. Исследование зависимости максимального коэффициента усиления $K_{\max}$ первого канала (для многоканального усилителя) от межканального интервала по длине волны $\Delta\lambda$ от 0,4 нм до 1,6 нм ( $P_s=0,01$ мВт, $\lambda_s=1560$ нм, $P_p=290$ мВт, $n=8$ )

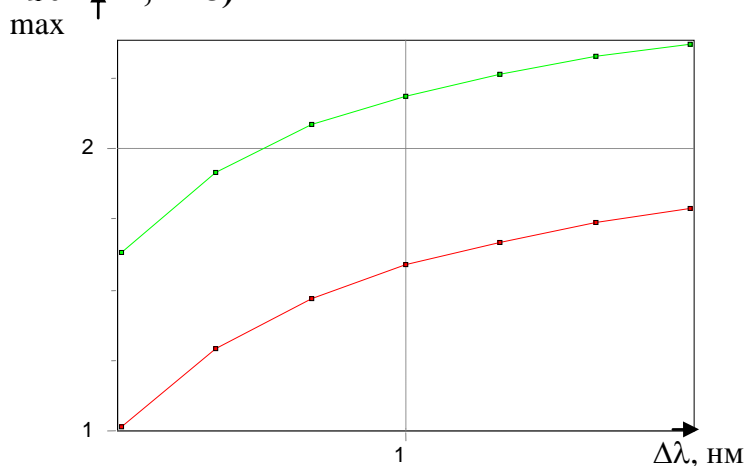


Рисунок 3.6.1 - Зависимость  $G_{\max}(\Delta\lambda)$

Выводы по пункту 6:

С ростом межканального интервала  $\Delta\lambda$  взаимное влияние каналов друг на друга уменьшается, в результате чего коэффициент усиления 1-го канала повышается (при достаточно малом значении межканального интервала наблюдается перекачивание энергии из одного канала в другой за счет связи между ними). (см. рис.3.6.1).

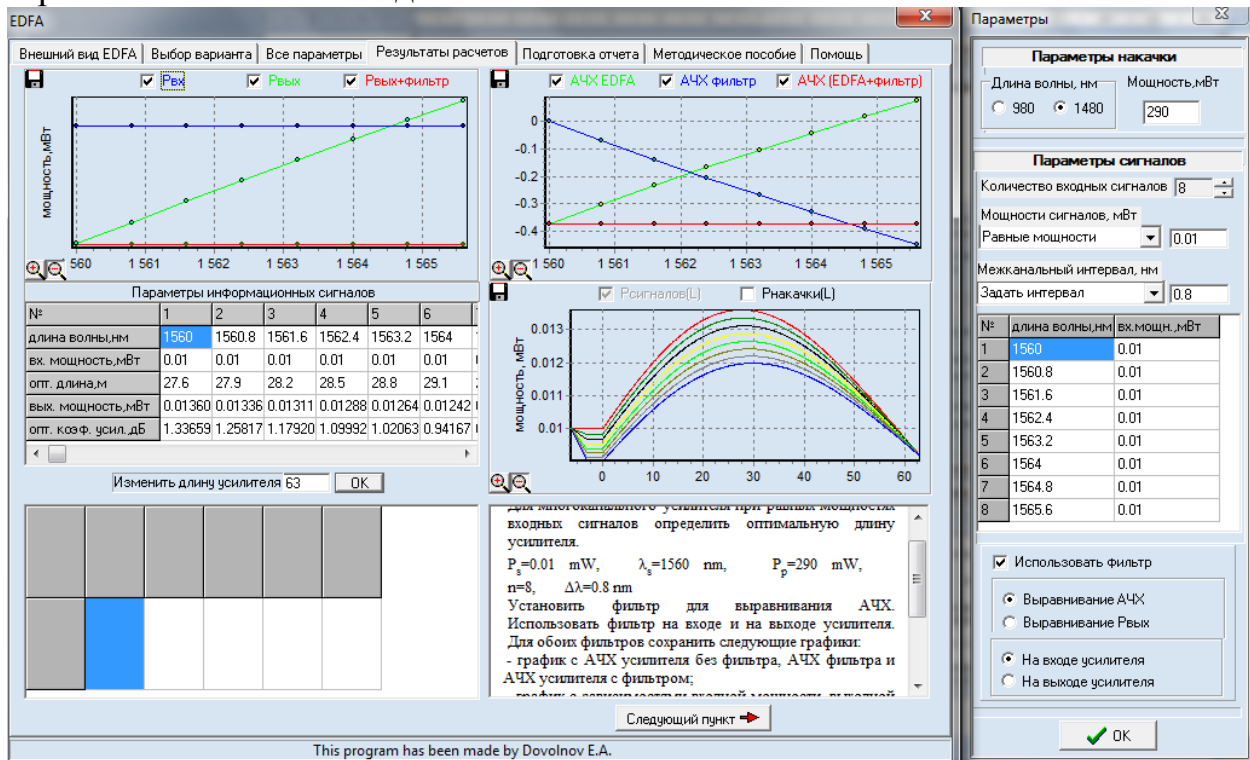
$L_{\max}(\Delta\lambda)$  имеет большие значения для накачки на длине волны 1480 нм, чем соответствующие значения для накачки на 980 нм, так как последняя предполагает наличие энергетического уровня  $4I1\ 1/2$  (выше метастабильного уровня).

### 3.7. Определим оптимальную длину для многоканального усилителя при равных мощностях входных сигналов ( $P_s=0,01$ мВт, $\lambda_s=1560$ нм, $P_p=290$ мВт, $n=8$ , $\Delta\lambda=0,8$ нм).

Установим фильтр для выравнивания АЧХ. Используем фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохраним следующие графики:

- график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
- график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;
- график с зависимостью мощности сигнала в каждом канале от длины

волокна при оптимальной длине волокна.  
 Выравнивание ачх на входе 1480



Выравнивание ачх на выходе 1480

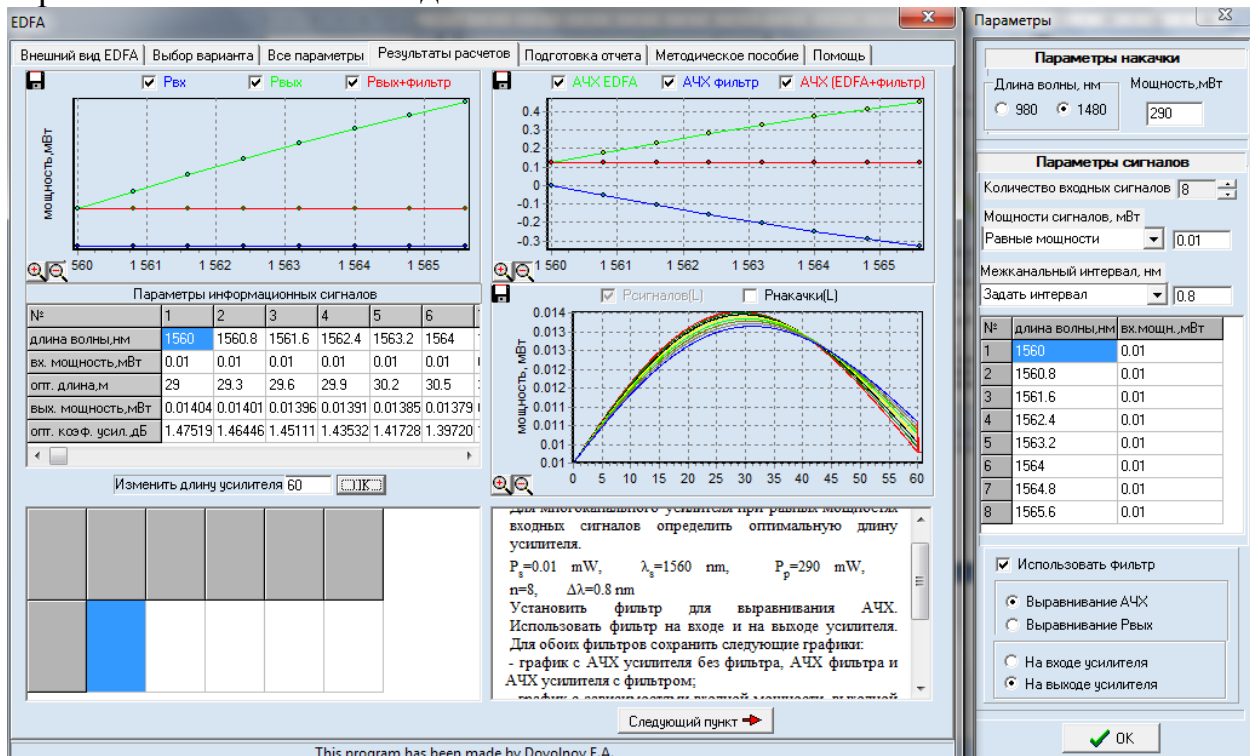


Рисунок 3.7.1 - Зависимость  $P_s(L)$ ,  $K(L_s)$ ,  $P_s(L_s)$

Выводы по пункту 7:

Применение фильтра на входе или выходе усилителя приводит к выравниванию АЧХ. В результате применения фильтра для выравнивания АЧХ на

входе EDFA полезный сигнал ослабляется, а шумы усилителя не изменяются, в итоге уменьшается отношение сигнал/шум. При применении фильтра на выходе EDF полезный сигнал практически не ослабляется, а шумы вносимы EDFA в спектр выходного сигнала подавляются.

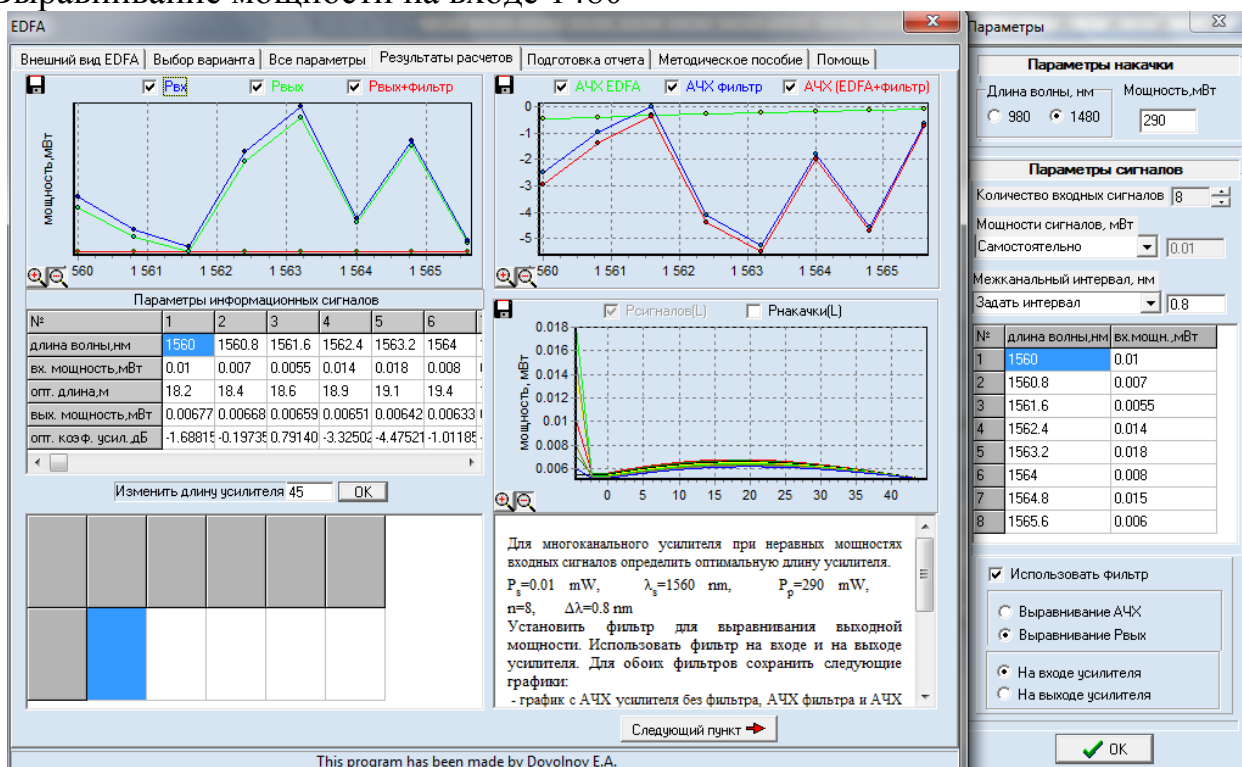
Из рисунков 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 видно, что при равных мощностях сигнала зависимости ведут себя почти линейно. Использование фильтров на входе или выходе усилителя позволяет выровнять АЧХ системы на входе или выходе усилителя одинаково эффективно, однако, фильтр, стоящий на входе, ухудшит отношение сигнал/шум притом же значении выходного сигнала.

### 3.8. Определение оптимальной длины для многоканального усилителя при неравных мощностях входных сигналов ( $P_s=0.01$ мВт, $\lambda_s=1560$ нм, $P_p=290$ мВт, $n=8$ , $\Delta\lambda=0.8$ нм).

Установим фильтр для выравнивания выходной мощности. Использовать фильтр на входе и на выходе усилителя. Для обоих фильтров сохраним следующие графики:

- график с АЧХ усилителя без фильтра, АЧХ фильтра и АЧХ усилителя с фильтром;
- график с зависимостями входной мощности, выходной мощности и выходной мощности после фильтра от номера канала;

#### Выравнивание мощности на входе 1480



## Выравнивание мощности на выходе 1480

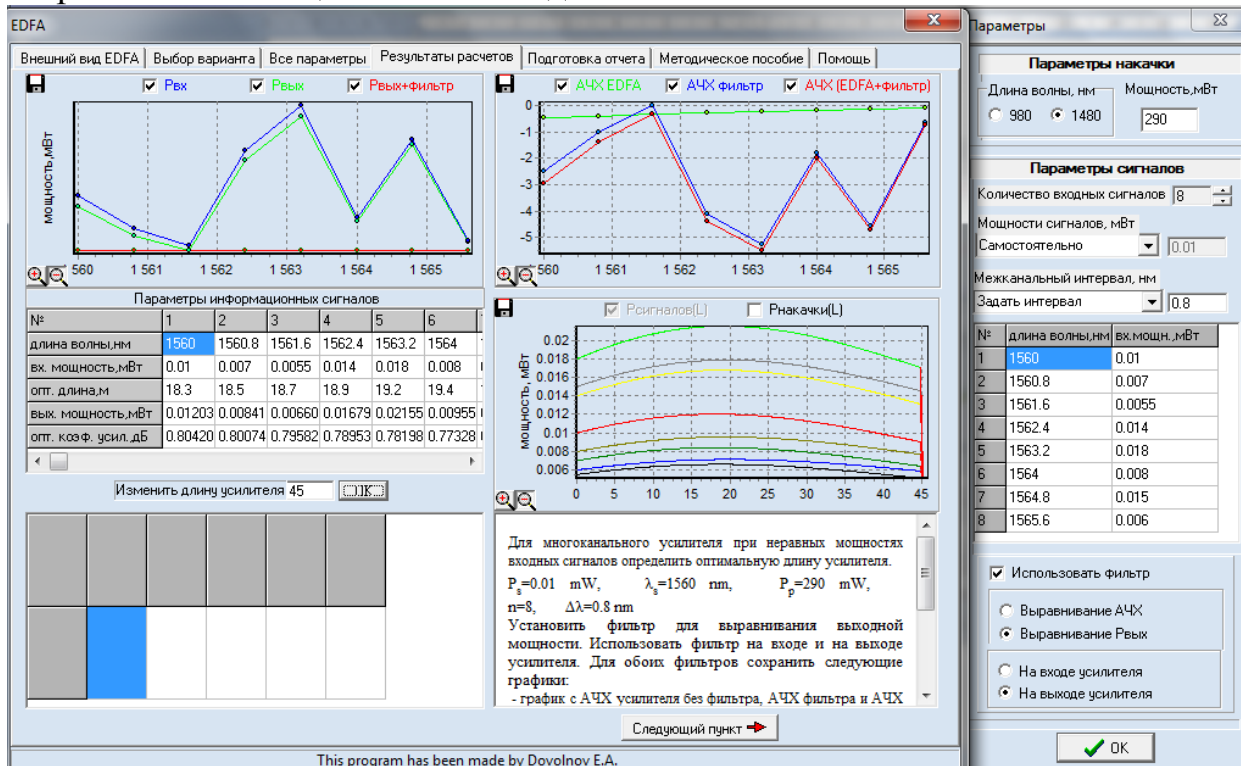


Рисунок 13 - Зависимость  $P_s(L)$ ,  $K(L_s)$ ,  $P_s(L_s)$

## Заключение

Данная работа позволила провести изучение принципов действия и компьютерное исследование основных характеристик и параметров мнговолновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей для обратной схемы накачки.

По полученным результатам можно судить о пригодности смоделированного в данной работе EDFA усилителя мощности. Для этого воспользуемся требованиями к параметрам оптических усилителей (РД 45.286-2002, приложение А).

Итак, в п.1 проводилось исследование зависимости оптимальной длины  $L_{opt}$  и максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности сигнала  $P_s$ . По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт соответствует коэффициентам усиления: на длине волны 1480 –  $K=6,16$ Дб, 980 –  $K=8,51$ Дб, что не соответствует мин. требованиям коэффициента усиления  $K=14$ Дб.

В п.2 проводилось исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от мощности накачки  $P_p$ . По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт – соответствует требованиям РД 45.286-2002, но при различных мощностях накачки, допустимый уровень коэффициента усиления не наблюдается.

В п.3 проводилось исследование зависимости  $K_{\max}$  от длины волны сигнала  $\lambda_s$ . По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт – соответствует требованиям РД 45.286-2002, но при различных длинах волн сигнала, допустимый уровень коэффициента усиления не наблюдается.

В п.4 проводилось Исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{\max}$  от температуры. По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт – соответствует требованиям РД 45.286-2002, но при различных температурах, допустимый уровень коэффициента усиления не наблюдается.

В п.5 проводилось исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{\max}$  первого канала от количества каналов при равных входных мощностях каждого канала. По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт – соответствует требованиям РД 45.286-2002, но при увеличении количества каналов равной входной мощности, допустимый уровень коэффициента усиления не наблюдается.

В п.6 проводилось исследование зависимости максимального коэффициента усиления  $K_{\max}$  первого канала (для многоканального усилителя) от межканального интервала по длине волны  $\Delta\lambda$ . По полученным результатам, руководствуясь приложением А можно сделать вывод: мин. уровень входной мощности 0,017 мВт – соответствует требованиям РД 45.286-2002, но при различных значениях межканального интервала по длине волны  $\Delta\lambda$ , допустимый уровень коэффициента усиления не наблюдается.

В п.7 и п.8 проводилось исследование оптимальной длины волны для многоканального усилителя при равных мощностях входных сигналов и при неравных мощностях входных сигналов. Были установлены фильтры АЧХ на входе и на выходе усилителя в п.7. В п.8 были установлены фильтры для выравнивания выходной мощности. В п.7 требованиям РД 45.286-2002 соответствовал только уровень входной мощности, равный у всех каналов 0,01 Дбм. В п. 8 требованиям РД 45.286-2002 соответствовал уровень входной мощности только у некоторых каналов, т.к. по условиям проведения исследования уровни мощности разных каналов - различны.

## 4 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ

Индивидуальные расчетные задания (контрольная работа) выполняются студентами заочной формы обучения в 10 семестре по теме «Компьютерное моделирование оптических мультиплексоров на интерференционных и Фабри-Перо фильтрах». Задания выполняются за счет временного ресурса, отводимого на самостоятельную работу. Перечень вопросов и методические материалы по выполнению расчетных заданий изложены в [3].

### 4.1. Варианты заданий

Исходные данные для выполнения расчетной работы «Моделирование оптического мультиплексора» находятся из таблицы 4.1 по номеру варианту задания, выданного преподавателем..

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения расчетной работы

Параметры	Вариант				
	1	2	3	4	5
Диапазон длин волн*, нм	1528,77 – 1532,68	1528,77 – 1536,61	1546,12 – 1554,13	1539,77 – 1549,32	1535,82 – 1538,98
$\Delta f_k$ , ГГц	200	200	400	200	100
$P_0$ (Дб)**	20	22	25	26	22
Тип [И.Ф]***	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.
$n_l$ [И.Ф]****	1.458	1.56	1.55	1.458	1.51
Параметры	Вариант				
	6	7	8	9	10
Диапазон длин волн*, нм	1549,32– 1553,33	1533,47– 1542,94	1546,12– 1554,13	1535,04– 1557,36	1530,33– 1536,61
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	400	500	200
$P_0$ (Дб)**	21	19	25	18	24
Тип [И.Ф]***	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.
$n_l$ [И.Ф]****	1.5	1.458	1.59	1.52	1.458
Параметры	Вариант				
	11	12	13	14	15
Диапазон длин волн*, нм	1550,92– 1554,13	1550,92– 1560,61	1533,47– 1557,36	1533,47– 1557,36	1541,35– 1550,92
$\Delta f_k$ , ГГц	100	200	600	1000	200
$P_0$ (Дб)**	23	20	18	19	24
Тип [И.Ф]***	Р.Ф.П.	И.М-Ц.	В.Р.	Р.Ф.П.	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]****	1.557	1.533	1.458	1.55	1.565

\*– центральные максимумы первого и последнего канала

\*\*– уровень переходных помех, который должен обеспечивать демультиплексор

\*\*\*– тип демультиплексора, построенного на интерференционных фильтрах:  
И.М-Ц – Интерферометр Маха-Цендера, Р.Ф-П. – резонатор Фабри-Перро, В.Р. – волоконная решётка

\*\*\*\*– значение показателя преломления  $n_l$  для демультиплексора построенного на интерференционных фильтрах

## 4.2. Пример выполнения расчетного задания

### 1 Демультиплексор на основе интерференционных фильтров

#### 1.1. Начальные данные

Параметры	Вариант №12
Диапазон длин волн	1550,92–1560,61
$\Delta f_k$ , ГГц	200
$P_o$ (Дб)	20
Тип [И.Ф]	И.М-Ц.
$n_l$ [И.Ф]	1.533

Число каналов вычислим исходя из частотного плана *ITU-T*. Для диапазона длин оптических волн с 1550,92 нм до 1560,61 нм с частотным интервалом 200 ГГц, число каналов  $n=7$ .

Таблица 1.1 – Вариант №12

Частота, ГГц	Длина волны, нм
193,3	1550,92
193,1	1552,52
192,9	1554,13
192,7	1555,75
192,5	1557,36
192,3	1558,98
192,1	1560,61

#### 1.2. Расчёт основных параметров

Рассчитаем период структуры для всех тонкоплёночных фильтров, входящих в демультиплексор, и толщину фильтров для  $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $7 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3}$ . Толщину всех фильтров будем считать постоянной. Расчет проведен в среде MathCad.

$$\lambda := \begin{pmatrix} 1550.9210^{-9} \\ 1552.5210^{-9} \\ 1554.1310^{-9} \\ 1555.7510^{-9} \\ 1557.3610^{-9} \\ 1558.9810^{-9} \\ 1560.6110^{-9} \end{pmatrix} \quad f := \begin{pmatrix} 193.310^{-12} \\ 193.110^{-12} \\ 192.910^{-12} \\ 192.710^{-12} \\ 192.510^{-12} \\ 192.310^{-12} \\ 192.110^{-12} \end{pmatrix} \quad \Delta n := \begin{pmatrix} 10^{-4} \\ 3 \cdot 10^{-4} \\ 7 \cdot 10^{-4} \\ 10^{-3} \end{pmatrix}$$

n1 := 1.533    θ := 0  
i := 0..6    j := 0..3

$$n2_j := n1 + \Delta n_j \quad n2 = \begin{pmatrix} 1.5331 \\ 1.5333 \\ 1.5337 \\ 1.534 \end{pmatrix} \quad \Delta n = \begin{pmatrix} 0.0001 \\ 0.0003 \\ 0.0007 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{i,j} := \frac{\lambda_i}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{n1^2 + (n2_j)^2} \cdot \cos(\theta) \cdot 10^{-6}}$$

Δ =

	0	1	2	3
0	0.505828	0.505795	0.505729	0.50568
1	0.50635	0.506317	0.506251	0.506201
2	0.506875	0.506842	0.506776	0.506726
3	0.507404	0.50737	0.507304	0.507255
4	0.507929	0.507896	0.507829	0.50778
5	0.508457	0.508424	0.508358	0.508308
6	0.508989	0.508955	0.508889	0.508839

$$L_{i,j} := \frac{\operatorname{atanh}(\sqrt{0.999}) \cdot \lambda_i \cdot \cos(\lambda_i) \cdot \sqrt{(n2_j)^2 + n1^2}}{\sqrt{2} \cdot \left| (n2_j)^2 - n1^2 \right| \cdot 10^{-3}} \quad L =$$

	0	1	2	3
0	32.156579	10.71886	4.593797	3.215658
1	32.189754	10.729918	4.598536	3.218976
2	32.223135	10.741045	4.603305	3.222314
3	32.256724	10.752241	4.608104	3.225673
4	32.290105	10.763369	4.612872	3.229011
5	32.323694	10.774565	4.617671	3.23237
6	32.357491	10.78583	4.622499	3.235749

Результаты расчёта для всех Δn занесём в таблицы 1.2, 1.3, 1.4 и 1.5.

Таблица 1.2 – Результаты расчёта демультимплектора на тонкоплёночных фильтрах для Δn = 1·10<sup>-4</sup>

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
λ <sub>i</sub> , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
Δ <sub>i</sub> , мкм	0,505828	0,50635	0,506875	0,507404	0,507929	0,508457	0,508989
L <sub>int(n/2)</sub> , мм	32,256724						

Таблица 1.3 – Результаты расчёта демультимплектора на тонкоплёночных фильтрах для Δn = 3·10<sup>-4</sup>

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
λ <sub>i</sub> , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
Δ <sub>i</sub> , мкм	0,505795	0,506317	0,506842	0,50737	0,507896	0,508424	0,508955
L <sub>int(n/2)</sub> , мм	10,752241						

Таблица 1.4 – Результаты расчёта демультимплектора на тонкоплёночных



фильтрах для  $\Delta n = 7 \cdot 10^{-4}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,505729	0,506251	0,506776	0,507304	0,507829	0,508358	0,508889
$L_{int(n/2)}$ , мм	4,608104						

Таблица 1.5 – Результаты расчёта демультиплексора на тонкоплёночных фильтрах для  $\Delta n = 10^{-3}$

Параметр/ № фильтра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta_i$ , мкм	0,50568	0,506201	0,506726	0,507255	0,50778	0,508308	0,508839
$L_{int(n/2)}$ , мм	3,225673						

### 1.3. Компьютерное моделирование

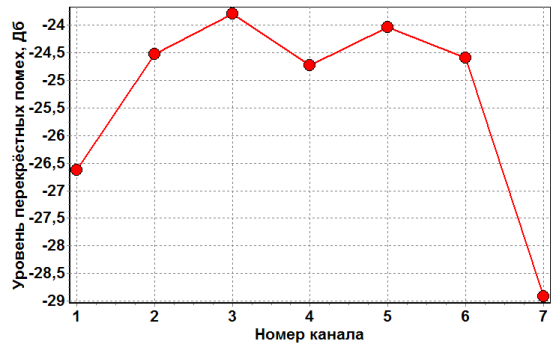
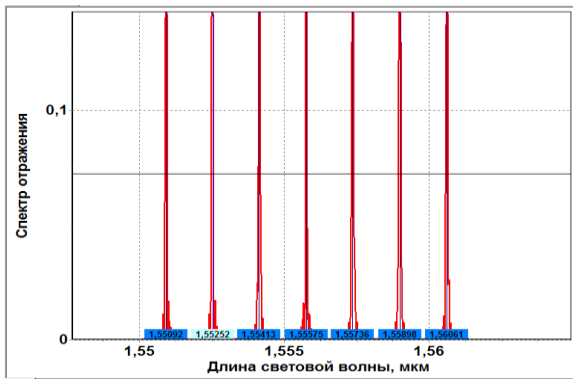
#### 1.3.1 Исследование зависимости максимальных переходных помех ( $P_{max}$ ) от $\Delta n$ .

Определим переходные помехи демультиплексора при различных значениях  $\Delta n$ , вычисленных в расчётном задании. Результаты занесём в таблицу 1.6.

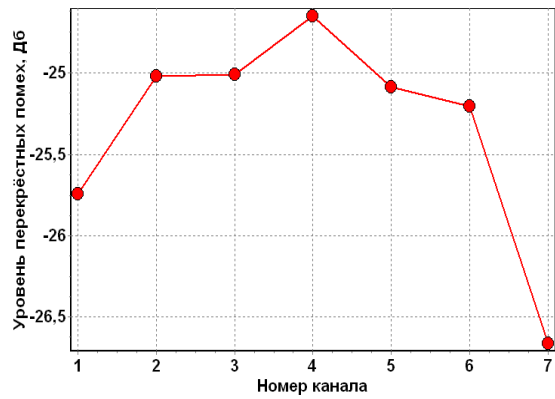
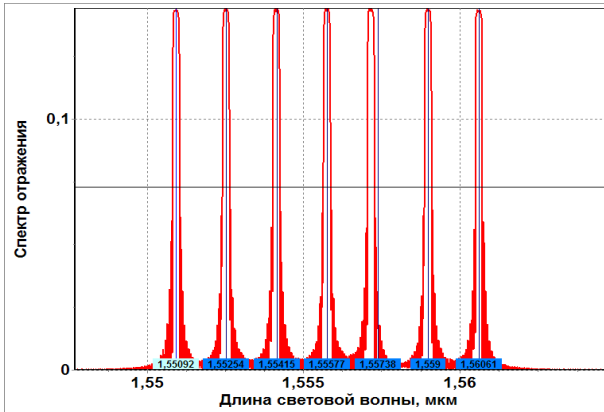
Таблица 1.6 – Зависимость максимальных переходных помех от  $\Delta n$ .

Параметр / $\Delta n$	$10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$
$\Delta\lambda$ , нм	0,074	0,246	0,533	0,745
$P_{max}$ , дБ	-28,9	-24,81	-19,97	-17,54

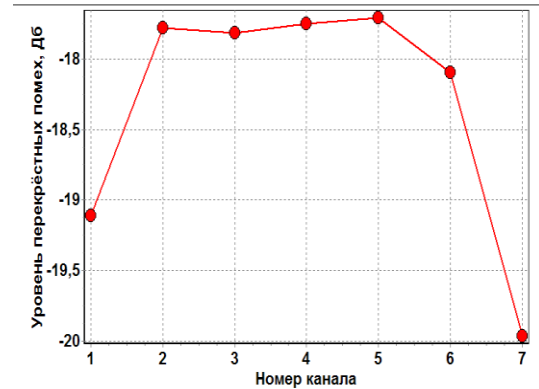
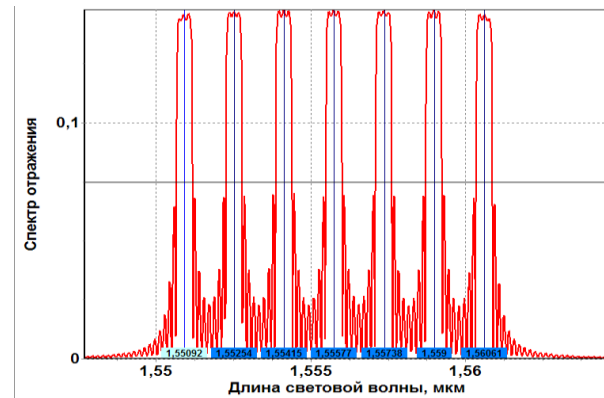
Полученные графики аппаратных функции демультиплексоров и рассчитанные графики переходных помех, при различных значениях  $\Delta n$ , приведены на рисунке 1.1 а, б, в, г. Далее, пользуясь данными таблицы 1.6, построим зависимость  $P_{max}(\Delta n)$ , она представлена на рисунке 1.2.



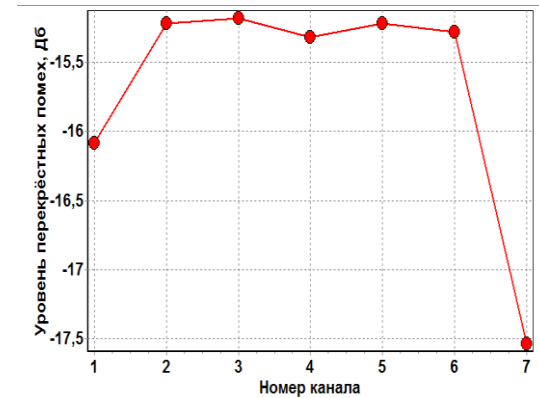
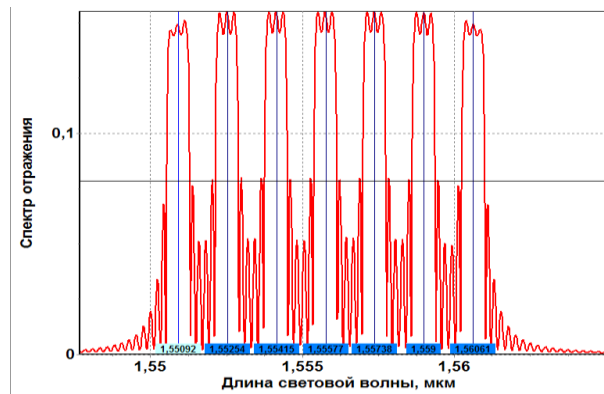
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.1 – Графики аппаратных функции демультиплекторов (слева) и рассчитанные графики переходных помех (справа), при  $\Delta n = 10^{-4}$  (кривая а),  $\Delta n =$

$3 \cdot 10^{-4}$  (кривая б),  $\Delta n = 7 \cdot 10^{-4}$  (кривая в),  $\Delta n = 10^{-3}$  (кривая г).

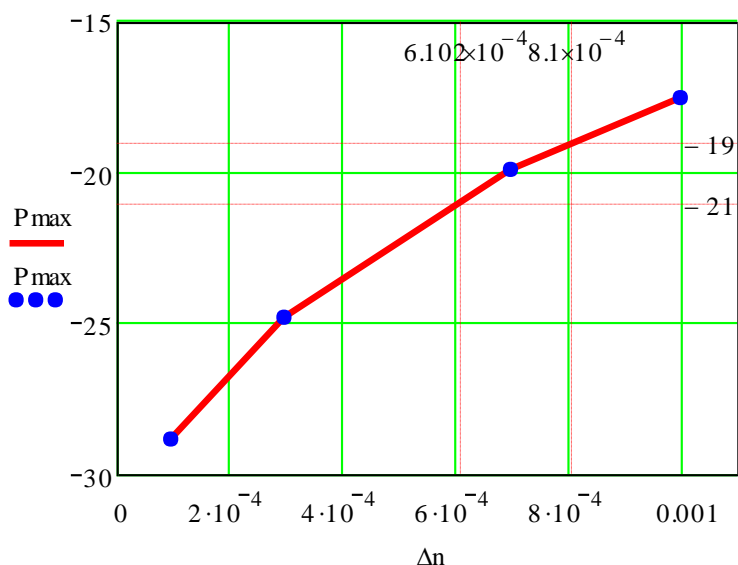


Рисунок 1.2 – График зависимости  $P_{\max}(\Delta n)$ .

По рисунку 1.1 и таблице 1.6 видно, что с увеличением величины  $\Delta n$  увеличивается полоса пропускания фильтров, тем самым в полосу пропускания попадают боковые лепестки сигнала соседних каналов, что в свою очередь приводит к увеличению переходных помех, что очень хорошо продемонстрировано на рисунке 1.2.

### 1.3.2. Нахождение оптимальной разницы показателей преломления

Найдём оптимальную разницу показателей преломления, при которой максимальный уровень переходных помех будет равен  $P_0 \pm 1$  дБ. Для этого на основе аппроксимации зависимости  $P_{\max}(\Delta n)$  найдём такой  $\Delta n$ , который удовлетворял бы уравнению  $P_{\max}(\Delta n) = P_0 \pm 1$  дБ. По рисунку 1.2 видно, что оптимальный диапазон находится в диапазоне от  $6,102 \cdot 10^{-4}$  до  $8,1 \cdot 10^{-4}$ , а оптимальное значение будет:  $\Delta n_{\text{opt}} = 7 \cdot 10^{-4}$ .

### 1.3.3 Расчёт конструкционных параметров фильтров при $\Delta n_{\text{opt}}$

Рассчитаем конструкционные параметры фильтров при  $\Delta n_{\text{opt}}$ , а затем на основе полученных параметров смоделируем аппаратную функцию демультиплексора (рисунок 1.4 слева) и рассчитаем переходные помехи (рисунок 1.4 справа). Полученные результаты занесём в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Результаты расчёта и моделирования при  $\Delta n_{\text{opt}}$

Параметр/ № филь- тра	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_i$ , нм	1550,92	1552,52	1554,13	1555,75	1557,36	1558,98	1560,61
$\Delta n_{\text{opt}}$	$7 \cdot 10^{-4}$						
$\Delta$ , мкм	0,505729	0,506251	0,506776	0,507304	0,507829	0,508358	0,508889

$L_{int(n/2)}$ , ММ	4,608104					
$\Delta\lambda$ (нм)	0,533					
$P_i$ , дБ	-19,67	-19,26	-19,14	-19,3	-22,02	

### 1.3.4. Исследование переходных помех демультиплексора с оптимальными параметрами

Для демультиплексора с оптимальными параметрами, наблюдаем влияние всех соседних каналов на каждый канал в отдельности. Полученные зависимости переходных помех представлены на рисунке 1.4.

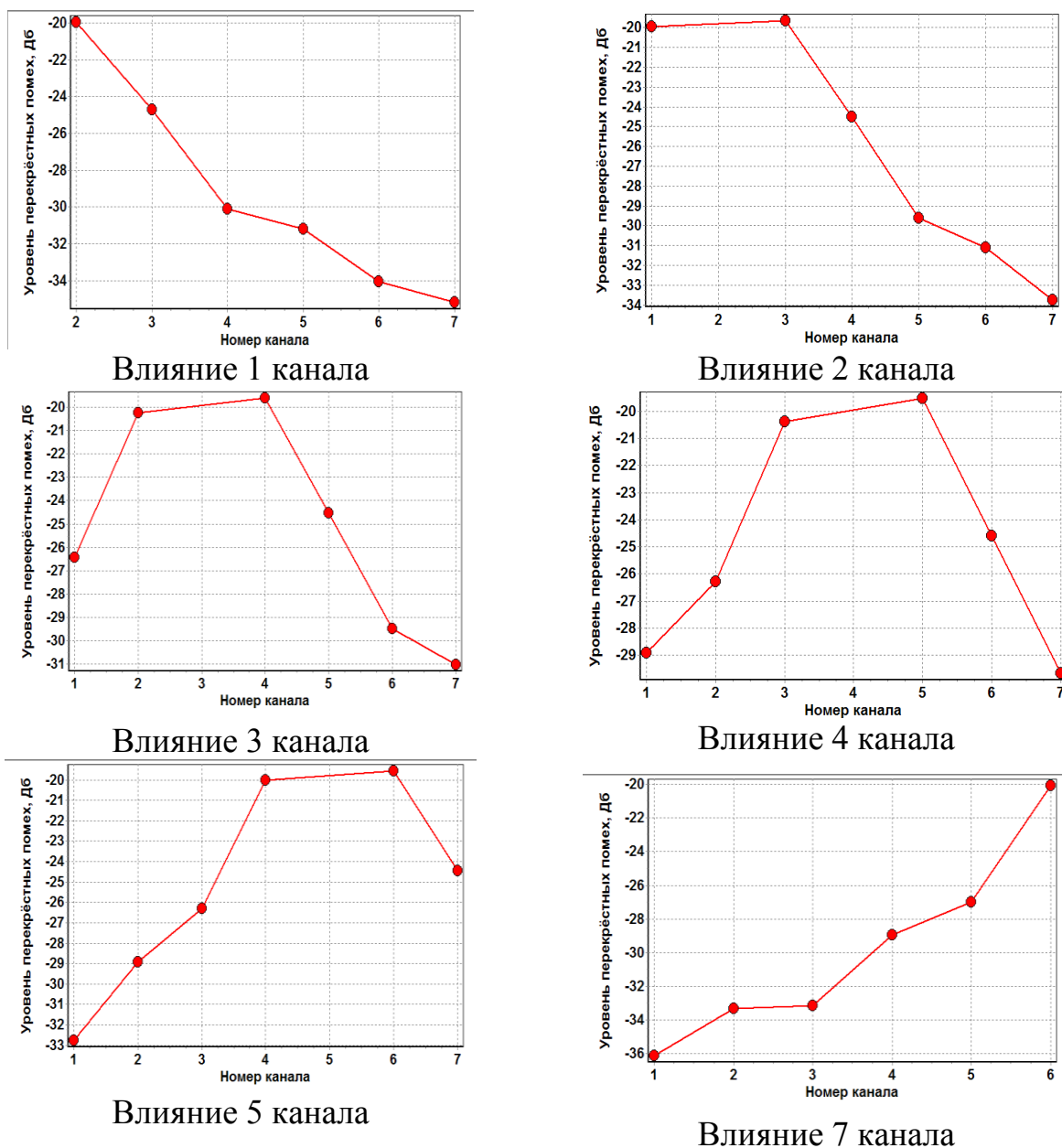


Рисунок 1.3 – Зависимость переходных помех от номера канала.

Анализируя зависимости, представленные на рисунке 1.3, видим, что переходная помеха исследуемого канала на соседний тем меньше, чем дальше

расположен этот соседний канал. Другими словами, чем дальше канал отстоит от соседнего, тем меньше он вносит помех. Физическая суть этого заключается в следующем: амплитуда боковых лепестков сигнала, передаваемого в исследуемом канале уменьшается с удалением от центральной частоты канала, и тем самым их влияние, в виде переходной помехи, уменьшается, что хорошо заметно на графиках, представленных на рисунке 1.3.

Результирующий график аппаратной функции демультиплексоров (слева) и рассчитанный график переходных помех (справа), при  $\Delta n_{opt} = 7 \cdot 10^{-4}$ , представлен на Рис.1.4.

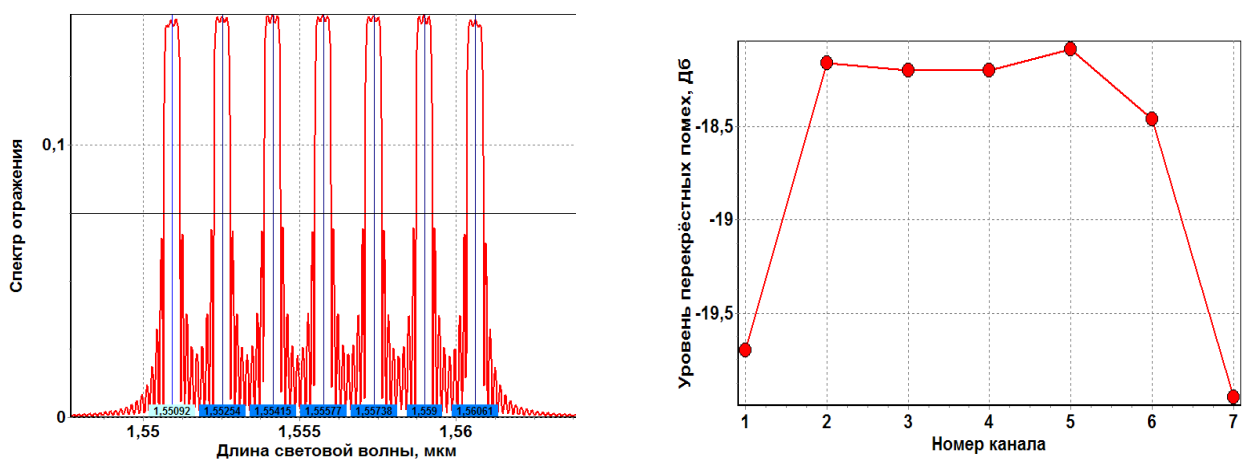


Рисунок 1.4 – График аппаратной функции демультиплексоров (слева) и рассчитанный график переходных помех (справа), при  $\Delta n_{opt} = 7 \cdot 10^{-4}$ .

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Ниже приведен перечень тем и вопросов контрольных работ, проводимых для студентов дневной формы обучения.. При подготовке к контрольным работам следует использовать методические материалы, указанные при описании разделов лекционного курса в п.2.1.

### Контрольная работа №1

#### ТЕМА: Методы и стандарты уплотнения информационных потоков

##### Методы уплотнения информационных потоков

1. Метод временного уплотнения (TDM).
2. Метод частотного уплотнения (FDM).
3. Модовое уплотнение (MDM). Уплотнение по поляризации (PDM).
4. Многоволновое уплотнение оптических несущих (WDM).
5. Оптическое временное уплотнение (OTDM).
6. Методы уплотнения каналов по поляриности

##### Общая структура и параметры оптических систем волнового уплотнения

7. Общие принципы построения, описание и структура цифровых WDM си-

стем.

8. Общее описание и параметры CWDM, DWDM, HDWDM систем.
9. Критерии обеспечения требуемых характеристик.
10. Определение запаса по мощности. Оценка энергетического бюджета

### **Стандарты на системы, оборудование и компоненты волнового уплотнения**

11. Стандарты Международного телекоммуникационного союза ITU на применение технологий и оборудования, Международной электротехнической комиссия IEC для оборудования SDH/SONET оптических цифровых систем передачи.
12. Частотный план, стандартизованный ITU-T.
13. Рекомендации ITU-T G.mcs на оптические интерфейсы для многоканальных систем
14. Рекомендации ITU-T G.mcs и IEC 6129x для оптических волокон,
15. Рекомендации ITU-T G.mcs для пассивных компонент оборудования WDM
16. Рекомендации ITU-T G.mcs и активных компонент оборудования WDM.

### **Контрольная работа №2**

#### **ТЕМА: Характеристики компонент оптических систем волнового уплотнения**

##### **Мультиплексоры и демультиплексоры**

1. Число каналов, полоса пропускания, ;
2. Центральная частота и межканальный интервал,
3. Изоляция и дальние переходные помехи, неравномерность распределения потерь по каналам;
4. Поляризационные явления – поляризационно зависимые потери,
5. Поляризационные явления - поляризационно-модовая дисперсия;
6. Спектральная зависимость вносимых потерь;
7. Направленность – ближние переходные помехи; потери на отражение

##### **Оптическое волокно**

8. Хроматическая дисперсия,
9. Поляризационная модовая дисперсия первого и второго порядка;
10. Нелинейные эффекты -вынужденное обратное рассеяние бриллюэна–мандельштама,
11. Нелинейные эффекты - вынужденное рамановское или комбинационное рассеяние ,
12. Нелинейные эффекты -фазовая автомодуляция,
13. Нелинейные эффекты - перекрестная фазовая модуляция,
14. Нелинейные эффекты - четырехволновое смешение.

##### **Оптические усилители**

15. Спектральная зависимость и равномерность коэффициента усиления,

16. Коэффициент усиления слабых сигналов и перекрестного насыщения,
17. Выходная мощность насыщения,
18. Шумовые параметры – шум-факторы усиленного спонтанного излучения и многолучевой интерференции,
19. Зависимость усиления от поляризации.

### **Передатчики**

20. Выходная мощность, стабильность центральной частоты,
21. Спектр и боковые лепестки излучения.
22. Методы модуляции – внутренняя (токовая) и внешняя (интерферометры маха-цандера, электрооптическая)
23. Методы стабилизации длины волны – температурная, токовая.
24. Стабилизаторы длины волны на основе диэлектрических фильтров.
25. Выравнивание спектрального распределения мощности.

### **Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов**

26. Скорость переключения и емкость
27. Коэффициент ослабления, вносимые потери
28. Переходное затухание, поляризационные потери

## **Контрольная работа №3**

### **ТЕМА: Компоненты мультиплексорного оборудования**

#### **Технологии и схемы реализации мультиплексных модулей WDM**

1. Технология мультиплексирования на основе интерференционных фильтров
2. Технология мультиплексирования на основе явления угловой дисперсии
3. Современные технологии мультиплексирования (принцип действия, схема) на основе дифракционной решетки на массиве волноводов
4. Современные технологии мультиплексирования (принцип действия, схема) на основе дифракционной решетки на массиве волноводов
5. Современные технологии мультиплексирования (принцип действия, схема) на основе на основе трехмерного оптического мультиплексирования

#### **Оптические мультиплексоры ввода-вывода**

6. Структура оптических мультиплексоров первого поколения
7. Структура оптических мультиплексоров второго поколения
8. Оптические технологии ввода-вывода несущих (принцип действия, схема) с использованием фильтров на основе оптоволоконных дифракционных решеток Брэгга
9. Оптические технологии ввода-вывода несущих (принцип действия, схема) с использованием фильтров на основе резонаторов Фабри-Перо
10. Оптические технологии ввода-вывода несущих (принцип действия, схема) с использованием интерференционных фильтров на тонких пленках
11. Оптические технологии ввода-вывода несущих (принцип действия, схема) с использованием поляризационных фильтров на основе жид-

ких кристаллов

12. Оптические технологии ввода-вывода несущих (принцип действия, схема) с использованием акустооптических перестраиваемых фильтров
- 13.4. Оптическая коммутация и коммутаторы
14. Типы базовых оптических кросс-коммутаторов, основные параметры
15. Принцип действия, схема, параметры механических и электрооптических оптических коммутаторов
16. Принцип действия, схема, параметры термооптических и оптоэлектронных коммутаторов
17. Принцип действия, схема, параметры интегральных активно-волноводных коммутаторов и коммутаторов на фотонных кристаллах.
18. Принцип действия, схема, параметры коммутаторов на матрицах оптоэлектронных вентилях, коммутируемых лазерным лучом

### **Оптические волновые конверторы (транспондеры)**

19. Типы волновых конверторов, основные параметры
20. Принцип действия, схемная реализация оптоэлектронных конверторов
21. Принцип действия, схемная реализация конверторов на основе оптической перекрестной модуляции
22. Принцип действия, схемная реализация конверторов на основе эффекта четырехволнового смешения

**Методические указания:** При ответе на вопросах использовать характеристики промышленных терминальных мультиплексоров WDM, мультиплексоров ввода/вывода, оптических усилителей, транспондеров, которые берутся для следующих производителей [2,1-16]:

- оборудование Optix BWS 320G (Huawei Technologies Company),
- оборудование SpectralWave 40/80 DWDM System (NEC),
- оборудование 1640 WM (Alcatel),
- оборудование 1648 WM (Alcatel),
- оборудование "Пуск" (НТО "Ирэ-Полус"),
- оборудование SURPASS hit 7550 (Siemens).



## 6 ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

Подготовка к зачету содействует систематизации, обобщению и закреплению знаний, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий, и должна вестись в течение всего семестра. Организация самостоятельной работы в семестре является залогом успешной сдачи зачетов.

### 6.1 Перечень вопросов

1. История развития мнговолновых ВОСП и устройств волнового уплотнения WDM Мировой уровень развития оптической связи с использованием WDM.
2. Методы уплотнения информационных потоков. Метод временного уплотнения (TDM). Области использования, перспективы.
3. Методы уплотнения информационных потоков. Модовое уплотнение (MDM). Области использования, перспективы.
4. Методы уплотнения информационных потоков- Мнговолновое уплотнение оптических несущих (WDM). Области использования, перспективы
5. Стандарты Международного телекоммуникационного союза ITU на применение технологий и оборудования, Международной электротехнической комиссия IEC для оборудования SDH/SONET оптических цифровых систем передачи. Частотный план, стандартизованный ITU-T.
6. Рекомендации ITU-T G.mcs на оптические интерфейсы для многоканальных систем и IEC 6129x для оптических волокон, пассивных и активных компонент оборудования WDM.
7. Общая структура и параметры оптических систем волнового уплотнения. Критерии обеспечения требуемых характеристик Оценка энергетического бюджета.
8. Общие принципы построения, описание и структура цифровых WDM систем. Общее описание и параметры DWDM, HDWDM систем. Определение запаса по мощности.
9. Характеристики передающих компонент систем волнового уплотнения – выходная мощность, стабильность центральной частоты, спектр и боковые лепестки излучения.
10. Характеристики компонент систем волнового уплотнения. Передатчики - методы модуляции – внутренняя (токовая) и внешняя (интерферометры Маха- Цендера, электрооптическая).
11. Методы стабилизации длины волны оптических передатчиков– температурная, токовая. Стабилизаторы длины волны на основе диэлектрических фильтров. Выравнивание спектрального распределения мощности.
12. Принципы интеграции передающих оптических модулей– (лазер, модулятор, полупроводниковый усилитель, (мультилазер, мультиплексор, усилитель).

13. Принципы построения коммутаторов для устройств оптической кросс-коммутации ОХС. Волновые разветвители.
14. Волоконно-оптические- оптические интерференционные фильтры - односторонние фильтры ( фильтры коротких и длинных длин волн).
15. Волоконно-оптические- оптические интерференционные фильтры- избирательные режекторные и полосовые фильтры, характеристики фиксированного оптического фильтра компании DiCon.
16. Волоконно-оптические- оптические фильтры на основе дифракционных решеток. Типовые параметры
17. Периодическая волноводная решетка AWG, Принцип действия AWG и параметры.
18. Фильтры с регулируемой полосой пропускания, настраиваемые фильтры с интерференционным покрытием. Основные характеристики перестраиваемого оптического фильтра компании DiCon
19. Акустооптические фильтры, а также резонаторы Фабри- Перо как Волоконно-оптические -оптические фильтры.
20. WDM Волоконно-оптические интерференционные фильтры- реализация для много- входных селекторов на основе трехполюсного делителя (непоглощающего интерференционного фильтра).
21. Оптические усилители для WDM систем – особенности построения и характеристик.
22. Оптические усилители на волокне, использующие бриллюэновское рассеяние. Стимулированное бриллюэновское рассеяние - нелинейный эффект. Характеристики.
23. Оптические усилители на волокне, использующие рамановское рассеяние. переходные помехи между усиливаемыми каналами
24. Полупроводниковые лазерные усилители – принцип действия, характеристики, интеграция ППЛУ с другими оптическими устройствами.
25. Усилители на примесном волокне Общие сведения об EDFA Классификация EDFA по способам применения.
26. Принцип действия EDFA Технические параметры и характеристики EDFA Основные структурные схемы EDFA.
27. Математическая модель многоволнового EDFA Основные характеристики усилителей EDFA производителя THORLABS (Япония, 2002)
28. Разновидности усилителей EDFA Усилители EDFA на кремниевой основе и на фтор- цирконатной основе. Сравнительная характеристика.
29. Типовые характеристики EDFA Усиление волоконно-оптического усилителя. Усиление слабого сигнала Насыщенное усиление Зависимость усиления от поляризации Спектральный провал усиления.
30. Типовые характеристики EDFA Неравномерность и спад усиления Расширение полосы частот усилителей- использовании EDFA усилителей с оптическими фильтрами, выравнивающими усиление.
31. Сравнительная характеристика оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров, фильтров Фабри- Перро.
32. Принцип действия оптических демультиплексоров на основе интерфе-

- ренционных фильтров Основные параметры и характеристики.
33. Принцип действия оптических демультиплексоров на основе фильтров Фабри-Перро Основные параметры и характеристики
  34. Принцип действия оптических демультиплексоров на основе дифракционных решеток. Основные параметры и характеристики.
  35. Оптические мультиплексоры с добавлением и отводом каналов. Конфигурация и характеристики волноводного многоканального оптического мультиплексора
  36. Интеграция оптических устройств. Перспективы использования ВСМ/Д на оконечных станциях ВОЛС, связанные с возможностями их интеграции с источниками излучения.
  37. Принципиальная схема и основные характеристики волноводной оптической системы спектрального мультиплексирования/ демультиплексирования на основе анализатора спектра типа эшелона Майкельсона.
  38. Принципиальная схема и основные характеристики волноводной оптической системы спектрального мультиплексирования/ демультиплексирования на основе матрицы сфазированных волноводов (фазар).
  39. Особенности тестирования систем со спектральным уплотнением. Основные параметры сигналов и компонентов. Требования к измерительному оборудованию.

**При ответе на вопросы необходимо дать подробное описание:**

- назначения устройства;
- физический принцип работы устройства (схема, рисунок);
- математические выражения, описывающие параметры устройства;
- основные технические характеристики;
- перспективы и направления развития.

## **6.2 Структура билета к зачету**

Билет состоит из двух теоретических вопросов по основным разделам курса «Мультиплексорное оборудование оптических цифровых систем связи».

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА ПО БРС

### 7.1. Методика текущего контроля освоения дисциплины

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на бально-рейтинговой системы оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (п.7.2.) и **итоговый** контроль.

**Правила формирования пятибалльных оценок** за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(Сумма\_баллов,\_набранная\_к\_КТx)*5}{Требуемая\_сумма\_баллов\_по\_бальной\_раскладке}.$$

**Итоговый контроль освоения** дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

**Формирование итоговой суммы баллов** осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

### 7.2. Применение бально-рейтинговой системы для студентов очной формы обучения

Таблица распределения баллов в течение семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл за 1-ю КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	5	10	10	<b>25</b>
Выполнение контрольных работ	10	10	10	<b>30</b>
Выполнение и защита результатов лабораторных работ		15	15	<b>30</b>
Компонент своевременности	5	5	5	<b>15</b>
<b>Итого максимум за период:</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>100</b>
<b>Нарастающим итогом</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

По дисциплине “ Многоволновые оптические системы связи ” учебная литература, охватывающая все разделы программы, приведена в списке литературы [1-4,7]. Для более углубленного изучения отдельных разделов и написания рефератов рекомендуется дополнительно использовать научно-техническую литературу [5,6,8], нормативные материалы [9,10], информацию от ведущих компаний по производству оборудования оптических цифровых систем связи (каталоги , обзоры, Интернет-сайты) [11-16]. Электронные версии всех перечисленных ниже источников имеются в электронной библиотеке кафедры и доступны студентам при работе в локальной вычислительной сети кафедры. Лабораторный практикум обеспечен разработанными на каф. СВЧиКР учебно-методическим пособием [2] и программным обеспечением [16-19], зарегистрированным в ОФАП, и осуществляется в специализированной компьютерной лаборатории кафедры СВЧиКР (лаб.333б).

### Список литературы

1. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов. - Новосибирск: СибГУТИ, 2005. – 136 с.
2. Шарангович, С. Н. Многоволновые оптические системы связи: Учебное пособие [Электронный ресурс] / С. Н. Шарангович. — СПб.: Лань, 2019. — 120 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/9188> (дата обращения 18.09.2022).
3. Шарангович, С. Н. Многоволновые оптические системы связи. Компьютерный лабораторный практикум: Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / С. Н. Шарангович. — Томск: ТУСУР, 2022. — 158 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/10051> (дата обращения 18.09.2022).
4. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи (4-е, дополненное издание)- М. : Эко-Тренд. 2007. -512 с..
5. Фокин, В.Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Г. Фокин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 440 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75523> (дата обращения 18.09.2022).
6. Скляр, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс] : учебное пособие / О.К. Скляр. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 268 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/104959> (дата обращения 18.09.2022).
7. Листвин В.Н., Трешиков В.Н. DWDM системы: научное издание. – М.: Издательский Дом «Наука», 2013. – 300 с.
8. РД 46.286-2002 Руководящий документ отрасли. Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным уплотнением. Технические

- требования. -2002. -21 с. -Режим доступа: <http://www.russgost.ru/catalog/item44155>. (дата обращения 18.09.2022).
9. Правила применения приёмо-передающих устройств для волоконно-оптических и атмосферных оптических линий передачи, утверждённые Приказом №23 Мининформсвязи от 27.02.2007 (зарегистрированы в Минюсте России 22.03.2007 г., регистрационный номер №9143).
  10. Alcatel-Lucent 1696 Metrospan (Metro WDM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www1.alcatel-lucent.com> (дата обращения 18.09.2022).
  11. WaveStar® OLS 1.6T, Lucent's core DWDM system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/products> (дата обращения 18.09.2022).
  12. Nortel's Wavelength Division Multiplexer (WDM) Portfolio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://products.nortel.com> (дата обращения 18.09.2022).
  13. Оборудование оптической передачи OptiX [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.huawei.ru/products/catalog/optix> (дата обращения 18.09.2022).
  14. SpectralWave 40/80. Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nec.co.uk/Spectral\\_Wave\\_4080.aspx](http://www.nec.co.uk/Spectral_Wave_4080.aspx) (дата обращения 18.09.2022).
  15. ECI Telecom Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eci-telecom.com> (дата обращения 18.09.2022).
  16. Лялюк А.П., Миргород В.Г., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптического мультиплексора на основе массива планарных волноводов». - М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501791. (Свидетельство №5495 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
  17. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе интерференционных фильтров и фильтров Фабри-Перро» .- М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501792. (Свидетельство №5496 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).
  18. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование многоволновых эрбиевых волоконно-оптических усилителей - М.: ВНИИЦ, 2006. - № 50200501793 . (Свидетельство №5497 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва. ).
  19. Кузнецов В.В., Шарангович С.Н. Компьютерная лабораторная работа «Исследование оптических демультиплексоров на основе наложенных голограмм в фотополимерном материале» - М.: ВНИИЦ, 2005. - № 50200501796. (Свидетельство №5500 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 20.12.2005. Москва.).

## Приложение А

### ВЫПОЛНЕНИЕ РЕФЕРАТИВНЫХ РАБОТ

#### 1. Общие требования

**Реферат** - краткое изложение содержания первичного документа (или его части) с основными фактическими сведениями. Роль первичного документа выполняет научное издание, монография, статьи. Второе значение этого понятия - доклад на определенную тему, включающий обзор соответствующих литературных и других источников, далее будем называть этот вид работы «реферат-доклад». Обычно студент сталкивается и с той, и с другой формой реферата [15].

Прежде чем выбрать тему реферата, определите свой интерес, над какой проблемой Вы хотели бы поработать, более глубоко изучить, и сформулируйте тему. Перед началом работы над рефератом следует наметить небольшой план и подобрать литературу. Прежде всего, воспользуйтесь литературой, рекомендованной учебной программой, а затем расширьте список источников, не забудьте использовать реферативные и специальные журналы, где Вы найдете новейшую научную информацию.

*Реферат составляется по следующему примерному плану:*

1. тема, предмет изучения, цель реферируемой работы;
2. методы проведения исследования в реферируемой работе. Если они новы, то их следует описать, если широко известны, то их следует только назвать;
3. существо работы, конкретные результаты работы. Приводятся основные теоретические, экспериментальные, описательные результаты, при этом предпочтение отдается новым результатам;
4. выводы (оценки, приложения), принятые и отвергнутые гипотезы, описанные в реферируемом источнике.

Если же реферат выполняется по нескольким источникам (реферат-доклад), необходимо написать **вводную часть**, раскрывающую общие подходы к рассматриваемой проблеме, и показать те особенности темы, которые вы собираетесь раскрыть, основываясь на реферируемых источниках, в конце работы сделать **обобщающие выводы и заключения**. Также необходимо в реферате-докладе оформлять **ссылки** на каждый реферируемый источник.

Обычно в реферате избегают вводных, общих фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), излагают материал кратко и точно. Умение отделять основную информацию от второстепенной - одно из основных требований к реферирующему. Хорошие результаты в выработке умения выделять основную информацию дает известный прием, названный условно *фильтрацией и сжатием текста*, который включает в себя две операции: ^

1. разбивку текста на части по смыслу;
2. нахождение в каждой части текста одного слова, краткой фразы или

обобщающей формулировки, выражающих основу содержания (ключевое понятие) этой части.

Основное *отличие реферата от реферируемого текста* - отсутствие избыточного материала, то есть удаление отдельных слов или частей текста, не несущих значимой информации, а также замена развернутых оборотов текста более лаконичными сочетаниями (свертывание).

## **2. Структура и оформление реферата**

Примерный план реферата:

1. Титульный лист.
2. План-оглавление.
3. Введение.

Дается постановка вопроса, объясняется выбор темы, ее актуальность и значимость, указываются цель и задачи реферата, дается характеристика используемой литературы.

4. Основная часть.

Состоит из нескольких разделов. Каждый раздел основной части раскрывает отдельную проблему или одну из ее сторон и логически является продолжением предыдущего. Допускается включение таблиц, графиков, схем.

5. Заключение.

Подводятся итоги или дается обобщенный вывод по теме реферата, даются рекомендации.

6. Библиография. Список реферируемых источников с указанием их полных библиографических данных

При написании реферата используются не менее 8-10 различных источников.

## **Темы рефератов**

1. Многоволновые оптические источники излучения
2. Многоволновые оптические мультиплексоры и демупльтиплексоры
3. Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов
4. Многоволновые оптические усилители
5. WDM волоконно-оптические интерференционные фильтры
6. WDM фильтры на основе дифракционных решеток
7. Волноводные оптические компоненты спектрального мультиплексирования /демультиплексирования
8. Принципы оптического мультиплексирования в полностью оптических сетях
9. Гибридные устройства и компоненты волнового уплотнения WDM



## Приложение Б

### ПОДГОТОВКА ПРЕЗЕНТАЦИИ В POWER POINT

Основные принципы подготовки информации на слайдах [15].

**1. Принцип контраста** — включать контрастные элементы, т.е. использовать разный размер шрифтов, разные цвета, символы.

Контраст — это то, что привлекает внимание.

**2. Принцип повторяемости** — в одной теме использовать повторение некоторых элементов оформления, например, использовать одинаковые рамки, цвет поля, тип шрифта. Это создает ощущение организованности и единства.

**3. Принцип упорядоченности** — элементы на странице не должны быть расположены произвольно (хаотично), они должны иметь некоторую видимую связь между собой.

**4. Принцип близости** — элементы, связанные общим смыслом, должны быть сгруппированы вместе, образуя как бы некоторую визуальную единицу.

Кроме этого, существуют некоторые **конкретные правила представления текстовой и статистической информации на слайдах:**

**Занимайте не больше четырех-шести строк.** Не включая заголовков и подзаголовков, текстовая информация должна занимать не более 4-6 строк. Чтение большего количества строк отвлекает внимание слушателей и затрудняет понимание.

**Используйте не более 40 символов в строке, включая пробелы.** Если использовать большее количество символов, то на слайде будет недостаточно свободного (чистого) пространства, которое необходимо оставлять для того, чтобы слушатели могли быстро «схватывать» информацию. Кроме того, плотно заполненный слайд выглядит не структурированным. Необходимо оставлять свободное пространство по краям и с боков.

**Не пишите предложения, а только ключевые слова.** Поскольку показ слайдов сопровождается объяснениями, нет никакой необходимости перегружать их словами.

**Используйте как заглавные, так и строчные буквы.** Исследования показывают, что использование заглавных и строчных букв облегчает чтение и распознавание слов. При использовании же только заглавных букв чтение и распознавание слов замедляются.

**Используйте одинаковые и стандартные шрифты.** Использование слишком замысловатых и непривычных шрифтов (или их чередование) требует дополнительных усилий, затруднит чтение и восприятие информации.

**Используйте цвет, большие буквы для того, чтобы выделить главное.** Можно усилить контрастность, используя цвет, буквы большего размера или добавляя простые изображения (картинки). Крупные буквы и яркий цвет направляют взгляд слушателей на то, что необходимо подчеркнуть.

**Не увлекайтесь спецэффектами.** Они должны применяться обоснованно. Помните, что от «летающих» букв рябит в глазах.

**Проверьте соответствие слайдов тексту доклада.** Очень неприятно

видеть удивленного докладчика, у которого неожиданно закончились слайды.

***Пользуйтесь дополнительными возможностями Power Point.***

В частности, у него есть возможность включить «представление докладчика». При этом слушателям будут видны только слайды, а на мониторе докладчика будут выводиться также заметки к слайду, идти отсчет времени и показываться следующие слайды.

***Презентация - это не текст доклада.*** Докладчик, превращающий свой доклад в комментарии к слайдам или того хуже - декламирующий текст со слайдов, выглядит неприглядно. Слайды должны дополнять сказанное им, а не повторять. В крайнем случае слайды могут конспективно фиксировать основные пункты, помогая следить за речью.

***Принято завершать презентацию слайдом с контактными данными или завершающей фразой.*** Например, «Спасибо за внимание!». Тогда аудитория не будет шокирована внезапно оборвавшимся показом слайдов.

Учебное издание

Шарангович Сергей Николаевич

**«МНОГОВОЛНОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
СВЯЗИ»**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной  
работе

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж ---- экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.