



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
И КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧиКР)**

А.Е. Мандель

**МЕТРОЛОГИЯ В ОПТИЧЕСКИХ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и
организации самостоятельной работы студентов специальности
210401 «Физика и техника оптической связи»**

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. кафедрой СВЧ и КР
_____ С.Н. Шарангович
" 01 " _____ 11 _____ 2010г.

**МЕТРОЛОГИЯ В ОПТИЧЕСКИХ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и
организации самостоятельной работы студентов специальности
210401 «Физика и техника оптической связи»

Разработчик:
профессор. каф. СВЧ и КР
_____ А.Е. Мандель

УДК
681.7.068(075.8)

Рецензент:
профессор каф.СВЧиКР

Шарангович С.Н.

А.Е. Мандель

Метрология в оптических телекоммуникационных системах: учебно-методическое пособие по практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов /

А.Е. Мандель. – Томск: ТУСУР, 2012. –28с

Приводится программа курса, его цели и задачи. Представлены темы лабораторных занятий, а также темы и методические указания по проведению практических занятий. Представлены темы и вопросы контрольных работ и перечень индивидуальных заданий. Приводится список экзаменационных вопросов и приведены примеры ответов на экзаменационные вопросы.

Методические указания предназначены для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения специальности 210401 по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах» и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки бакалавриата «Телекоммуникации».

УДК
681.7.068(075.8)

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2012

© Мандель А.Е. 2012

Оглавление

Введение.	5
1. Цели и задачи дисциплины.	7
2. Содержание разделов дисциплины.	8
3. Лабораторные занятия.	11
4. Практические занятия.	11
5. Контрольные работы	13
5.1. Контрольная работа №1.	13
5.2. Контрольная работа №2.	14
6. Экзаменационные вопросы	15
6.1. Список экзаменационных вопросов	15
6.2. Примеры ответов на экзаменационные вопросы.	16
7. Контрольные этапы и их максимальный рейтинг.	23
8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.	25

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.

Предметно и содержательно самостоятельная работа студентов определяется образовательным стандартом "Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по направлению 654400 «Телекоммуникации», включающего специальность 210401 - "Физика и техника оптической связи", утвержденным 10.03 2000, (Рег. № 20 тех/дс.) и рабочей программой по дисциплине «Метрология в оптических телекоммуникационных системах», утвержденной в ТУСУРе.

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.

Программа дисциплины «Метрология в оптических телекоммуникационных системах». предусматривает проведение практических

занятий (семинаров) параллельно с лекционным курсом. В пособии приведены методические указания, предназначенные для обеспечения самостоятельной подготовки студентов к практическим занятиям (семинарам). Работа на семинарах нацелена на закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях, а также дискуссии по материалу самостоятельно изученной студентами технической литературы. Основной формой проведения семинаров выбрана публичная защита рефератов, самостоятельно подготовленных студентами.

Пособие разработано в соответствии с временными рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобразования РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ. ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

1.1. Цель преподавания дисциплины

Целью учебной дисциплины "Метрология в оптических телекоммуникационных системах" является изучение системы метрологического обеспечения в оптическом диапазоне.

Место дисциплины в учебном процессе. Дисциплина "Метрология в оптических телекоммуникационных системах" относится к федеральному компоненту цикла специальных дисциплин и является одной из завершающих в цикле учебных дисциплин, формирующих уровень знаний специалиста.

Задачи изучения дисциплины

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- изучение студентами методов, схем и приемов измерений основных параметров оптических телекоммуникационных систем, их отдельных элементов и способов обеспечения требуемой точности измерений.
- изучение студентами принципов действия, устройство и технические характеристики основных рабочих средств измерений, используемых в системе метрологического обеспечения в оптическом диапазоне.

В результате изучения курса студенты должны:

знать

- методы измерений основных параметров оптических телекоммуникационных систем и их отдельных элементов;
- принципы действия основных средств измерений оптического диапазона;
- основные принципы поверки средств измерений;
- системы автоматического мониторинга и управления оптическими сетями

уметь

- выбирать необходимые средства измерений для решения конкретных измерительных задач при прокладке, настройке и эксплуатации оптических телекоммуникационных систем;

иметь практические навыки в проведении измерений в оптическом диапазоне, обработке и представлении результатов измерения.

1.2. Перечень обеспечивающих дисциплин.

Дисциплина "Метрология в оптических телекоммуникационных системах" базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения дисциплин: "Оптические цифровые телекоммуникационные системы", "Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи", "Основы физической и квантовой оптики", "Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства".

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Наименование тем, их содержание и объемы в часах лекционных занятий

2.1.1. Особенности метрологии в оптических телекоммуникационных системах – 2 часа

Самостоятельная работа - 1 час

Введение. Общие сведения о роли метрологического обеспечения в оптических телекоммуникациях. Основные понятия и определения системы метрологического обеспечения в оптических телекоммуникациях. Обработка и представление результатов измерения. Измерения статические и динамические. Измерения абсолютные и относительные. Измерения прямые, косвенные, совокупные и совместные. Обработка результатов прямых измерений. Алгоритм обработки результатов многократных измерений.

2.1.2. Измерительные задачи в оптических телекоммуникационных системах - 2 часа

Самостоятельная работа - 1 час

Основные задачи метрологического обеспечения в оптической связи. Основные измерительные задачи, решаемые в процессе производства, строительства и эксплуатации оптических телекоммуникационных систем. Виды измерений в оптических телекоммуникационных системах: входной контроль, настроечные, приемо-сдаточные, эксплуатационные плановые и эксплуатационные внеплановые.

Особенности ввода измерительной информации в оптические волокна. Апертурный угол. Согласование числовых апертур.

2.1.3. Измеряемые параметры в оптических телекоммуникационных системах - 2 часа

Самостоятельная работа - 1 час

Основные измеряемые параметры оптических многомодовых и одномодовых волокон. Основные измеряемые параметры и характеристики оптических излучателей. Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств. Основные измеряемые параметры каналов и трактов оптических телекоммуникационных систем. Основные измеряемые параметры в многоволновых системах передачи. Измеряемые параметры оптических усилителей.

2.1.4. Стандартизированные методики измерения излучения, проходящего через оптическое волокно. Средства измерений - 18 часов

Самостоятельная работа - 9 часов

Методы измерения абсолютной оптической мощности. Измерители оптической мощности на основе термофотодиодов. Радиометрический метод замещения. Радиометры.

Измерение малоинтенсивного оптического излучения с помощью фотодиодов. Факторы, влияющие на точность измерения абсолютной

мощности светового излучения. Принципы построения измерителей абсолютной оптической мощности. Основные технические и метрологические характеристики оптических ваттметров.

Методы измерения затухания оптических волокон: метод обламывания; метод вносимых потерь. Источники погрешностей при измерении затухания. Способы достижения равновесного распределения мод в многомодовых оптических волокнах. Оптические тестеры. Основные технические и метрологические характеристики оптических тестеров.

Особенности измерений параметров одномодовых оптических волокон. Длина волны отсечки одномодовых волокон. Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности. Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля.

Методы измерения диаметра модового пятна: метод ближнего и дальнего поля, метод поперечного смещения.

Виды дисперсии оптических волокон: межмодовая, хроматическая, поляризационная модовая. Методы измерения межмодовой дисперсии во временной области. Методы измерения хроматической дисперсии: метод сдвига фаз, метод дифференциального сдвига фаз. Факторы, влияющие на точность измерения хроматической дисперсии. Принципы построения и основные технические и метрологические характеристики измерителей хроматической дисперсии

Измерение поляризационной модовой дисперсии методом сканирования длины волны.

2.1.5. Методы и средства измерений излучения, проходящего через линейный тракт - 10 часов

Самостоятельная работа - 5 часов

Измерение коэффициентов ошибок в цифровых волоконно-оптических системах передачи. Особенности измерения коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона. Нормы на параметры ошибок цифровых систем передачи. Критерии оценки качества передачи в высокоскоростных сетях связи. Измерение коэффициентов ошибок с помощью псевдослучайной последовательности. Методы, основанные на анализе цифрового сигнала. Средства измерения коэффициентов ошибок. Примеры измерений с использованием анализатора коэффициента ошибок: измерение энергетического потенциала линии связи, измерение чувствительности приемного устройства, измерение запаса мощности, обусловленной дисперсией волокна.

Измерение дрейфа и дрожания фазы в цифровых волоконно-оптических системах передачи. Нормы на максимальное значение дрейфа и дрожания фазы для иерархических стыков цифровых систем передачи. Измерение фазового дрожания цифровым осциллографом. Измерение фазового дрожания фазовым детектором. Измерения фазового дрожания по критерию увеличения коэффициента ошибок.

Анализ оптического спектра в цифровых волоконно-оптических системах передачи. Дифракционная решетка как оптический фильтр. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток: однопроходный монохроматор, двухпроходный монохроматор, монохроматор Литтмана. Основные технические и метрологические характеристики анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток.

Интерферометр Фабри – Перо. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо. Их технические и метрологические характеристики. Методы калибровки анализаторов оптического спектра по длине волны.

Измерение спектральных характеристик с высоким разрешением в высокоскоростных цифровых линиях связи: гетеродинный метод измерения спектральных характеристик, автогетеродинный метод измерения спектральных характеристик.

2.1.6. Рефлектометрические измерения в оптических телекоммуникационных системах - 8 часов

Самостоятельная работа - 4 часа

Основы оптической рефлектометрии. Метод импульсной оптической рефлектометрии, основанный на измерениях мощности обратного рэлеевского рассеяния. Основные принципы построения и устройство рефлектометров. Технические и метрологические характеристики рефлектометров. Рефлектометр как многофункциональное средство измерений в оптических телекоммуникационных системах. Виды измерений с помощью оптических рефлектометров: измерение затухания, определение места повреждения кабеля, контроль стыков. Погрешности измерений.

Метод Бриллюэновской рефлектометрии. Измерения натяжения волокон с использованием Бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра.

2.1.7. Автоматизированные системы непрерывного мониторинга оптической сети - 4 часа

Самостоятельная работа - 2 часа

Основные направления автоматизации контроля волоконно-оптических линий связи. Основы построения систем дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System). Архитектура и функции систем дистанционного тестирования волокон. Организация измерений с закрытием и без закрытия связи. Основные функциональные характеристики систем мониторинга Orion, Atlas, FiberVisor, AccessFiber.

2.1.8. Метрологическое обеспечение средств измерений оптического диапазона - 2 часов

Самостоятельная работа - 1 час

Общие принципы поверки средств измерений оптического диапазона. Виды и методики поверок средств измерений. Рабочие эталоны, используемые при поверке средств измерений оптического диапазона. Организация и порядок поверки средств измерений.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

Основными целями выполнения лабораторных работ являются:

- изучение устройства и принципа действия средств измерений оптического диапазона;
- приобретение студентами практических навыков в проведении измерений в оптическом диапазоне;
- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины «Метрология в оптических телекоммуникационных системах».

При выполнении лабораторных работ студент должен продемонстрировать знание соответствующего теоретического материала и знакомство с учебно-методической литературой по заданной теме.

Список лабораторных работ:

1. Измерение характеристик фотоприемного устройства
2. Измерения затухания оптических волокон оптическим тестером
3. Изучение установки для сварки оптических волокон.
4. Изучение факторов, влияющих на информационно-пропускную способность ВОСП (моделирование на ЭВМ)
5. Изучение оптического рефлектометра
6. Обработка рефлектограмм оптических волокон (моделирование на ЭВМ)

Продолжительность каждой лабораторной работы 4 часа.

Методические указания к лабораторным работам представлены на образовательном портале ТУСУРа и в локальной сети кафедры СВЧиКР в разделе методических материалов профессора А.Е. Манделя.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Практические занятия проводятся в виде семинаров. Семинары направлены на закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях, а также самостоятельного углубленного изучения студентами отдельных вопросов учебного курса. Основной формой проведения семинаров является публичная защита самостоятельно подготовленных студентами рефератов с использованием списка литературы, рекомендованного преподавателем и Интернет ресурсов.

В начале занятия преподаватель объявляет тему и зачитывает порядок выступлений. Студенты представляют готовые рефераты преподавателю для проверки и излагают материал. После каждого выступления преподаватель проводит обсуждение данного раздела темы, делает необходимые замечания и дополнения к выступлению докладчика, задает контрольные вопросы. Содержание реферата оценивается по рейтинговой системе.

Индивидуальная работа преподавателя со студентом заключается в консультациях при подготовке студентом реферата.

Темы практических занятий:

1. Изучение технических и метрологических характеристик средств измерений излучения, проходящего через волокно и волоконно-оптический тракт.
2. Оптический импульсный рефлектометр (OTDR) как многофункциональное средство измерений в оптических телекоммуникационных системах
3. Метод Бриллюэновской рефлектометрии и приборы на его основе.
4. Автоматизированные системы непрерывного мониторинга оптической сети

Темы индивидуальных заданий (рефератов)

1. Оптические ваттметры. Принципы построения и Основные технические и метрологические характеристики. Основные области применения.
2. Оптические тестеры. Принципы построения и Основные технические и метрологические характеристики. Основные области применения.
3. Измерители хроматической дисперсии оптических волокон. Принципы построения и основные технические и метрологические характеристики
4. Методы и средства измерения коэффициентов ошибок.
5. Основные технические и метрологические характеристики анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток. Основные области применения.
6. Типы оптических импульсных рефлектометров. Их назначение.
7. Применение оптических импульсных рефлектометров (OTDR). Методика измерения длины оптического волокна.
8. Применение оптических импульсных рефлектометров (OTDR). Определение места повреждения волокон.
9. Применение оптических импульсных рефлектометров (OTDR). Измерение полных и погонных потерь в оптическом волокне.
10. Применение оптических импульсных рефлектометров (OTDR). Методика измерений коэффициентов отражения.
11. Физические основы метода Бриллюэновской рефлектометрии
12. Бриллюэновский анализатор (BOTDA – Brillouin optical time domain analyzer): оптическая схема, принцип работы, применение.
13. Бриллюэновский рефлектометр (BOTDR – Brillouin optical time domain reflectometer): оптическая схема, принцип работы, рефлектограммы, полученные с помощью BOTDR.
14. Измерение натяжения оптических волокон Бриллюэновским рефлектометром. Точность измерений натяжения оптических волокон.
15. Основы построения систем дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System).

16. Автоматизированная система непрерывного мониторинга ОК сетей связи AccessFiber (компания Agilent Technologies). Основные функциональные и технические характеристики

17. Автоматизированная система непрерывного мониторинга ОК сетей связи Atlas (компания Wavetek Wandel&Goltermann). Основные функциональные и технические характеристики.

18. Автоматизированная система непрерывного мониторинга ОК сетей связи FiberVisor (компания EXFO). Основные функциональные и технические характеристики.

19. Автоматизированная система непрерывного мониторинга ОК сетей связи Orion (компания GN Nettest). Основные функциональные и технические характеристики.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Целью контрольных работ является проверка знаний студентами основных положений изучаемого курса. При подготовке к контрольным работам удобнее всего пользоваться конспектами лекций и рекомендованными преподавателем учебниками, так как вопросы контрольных составляются на основе стандартной программы курса обучения. Ниже приведены основные вопросы контрольных работ.

5.1. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1

ТЕМА: Методы и средства измерения излучения, проходящего через оптическое волокно и волоконно-оптический тракт

1. Основные измеряемые параметры оптических многомодовых волокон
2. Основные измеряемые параметры оптических одномодовых волокон
3. Основные измеряемые параметры оптических излучателей
4. Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств
5. Основные измеряемые параметры оптических усилителей
6. Методы и средства измерения абсолютной оптической мощности
7. Методы и средства измерения затухания оптических волокон
8. Методы измерения диаметра модового пятна
9. Методы и средства измерения межмодовой дисперсии
10. Методы и средства измерения хроматической дисперсии
11. Методы и средства измерения длины волны отсечки одномодовых волокон.
12. Критерии оценки качества передачи в высокоскоростных сетях связи
13. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона

14. Измерение коэффициентов ошибок с помощью псевдослучайной последовательности
15. Измерение энергетического потенциала линии связи с использованием анализатора коэффициента ошибок
16. Дрейф и дрожание фазы. Измерение фазового дрожания фазовым детектором.
17. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо. Их технические и метрологические характеристики
18. Дифракционная решетка как оптический фильтр. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток
19. Методы измерения спектральных характеристик с высоким разрешением в высокоскоростных цифровых линиях связи

5.2. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

ТЕМА: Рефлектометрические измерения оптических волокон

1. Теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.
2. Основные принципы построения и устройство оптических рефлектометров
3. Технические и метрологические характеристики оптических рефлектометров
4. Виды измерений с помощью оптических рефлектометров: измерение затухания, определение места повреждения кабеля, контроль стыков
5. Основы метода Бриллюэновской рефлектометрии.
6. Измерения натяжения волокон с использованием Бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра.
7. Основы построения систем дистанционного тестирования волокон.
8. Организация измерений с закрытием и без закрытия связи.
9. Архитектура и функции систем дистанционного тестирования волокон.
11. Виды и методики поверки средств измерений.
12. Организация и порядок поверки средств измерений оптического диапазона.

6. Экзаменационные вопросы

Подготовка к экзаменам способствует систематизации, обобщению и закреплению знаний студентов, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий. Экзаменационный билет состоит из двух вопросов из нижеприведенного списка.

6.1. Список экзаменационных вопросов

1. Виды измерений систем передачи.
2. Основные измеряемые параметры оптических многомодовых и одномодовых волокон

3. Основные измеряемые параметры и характеристики оптических излучателей
4. Основные измеряемые параметры и характеристики фотоприемных устройств
5. Основные измеряемые параметры каналов и трактов оптических телекоммуникационных систем.
6. Основные измеряемые параметры оптических усилителей.
7. Методы и средства измерения абсолютной оптической мощности.
8. Методы и средства измерения затухания оптических волокон.
9. Методы измерения диаметра модового пятна.
10. Методы и средства измерения межмодовой дисперсии.
11. Методы и средства измерения хроматической дисперсии
12. Методы и средства измерения длины волны отсечки одномодовых волокон.
13. Принципы построения и основные технические и метрологические характеристики оптических ваттметров и оптических тестеров.
14. Измерение коэффициентов ошибок. Особенности измерителей коэффициентов ошибок в системах оптического диапазона.
15. Дрейф и дрожание фазы. Измерение фазового дрожания фазовым детектором.
16. Анализаторы оптического спектра на основе интерферометра Фабри – Перо. Их технические и метрологические характеристики
17. Дифракционная решетка как оптический фильтр. Конструкции анализаторов оптического спектра на основе дифракционных решеток. Их технические и метрологические характеристики
18. Методы измерения спектральных характеристик с высоким разрешением в высокоскоростных цифровых линиях связи
19. Теоретические основы метода обратного рэлеевского рассеяния.
20. Основные принципы построения и устройство оптических рефлектометров
21. Технические и метрологические характеристики оптических рефлектометров
22. Виды измерений с помощью оптических рефлектометров: измерение затухания, определение места повреждения кабеля, контроль стыков
23. Основы метода Бриллюэновской рефлектометрии.
24. Измерения натяжения волокон с использованием Бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра.
25. Основы построения систем дистанционного тестирования волокон.
26. Организация измерений с закрытием и без закрытия связи.
27. Архитектура и функции систем дистанционного тестирования волокон.
28. Виды и методики поверки средств измерений.
29. Организация и порядок поверки средств измерений оптического диапазона.

6.2. Примеры ответов на экзаменационные вопросы

При ответе на вопросы необходимо:

- дать описание измеряемого параметра;
- дать описание метода измерения;
- описать физический принцип работы средства измерения (схема, рисунок);
- привести основные технические характеристики средства измерения.

Пример 1. Вопрос: Методы и средства измерения затухания оптических волокон

Затуханием оптического волокна называется ослабление интенсивности света по мере распространения его в световоде. Затухание является наиболее важным параметром оптических волокон. Полное затухание оптического сигнала в световодах определяется коэффициентом затухания α , который характеризует ослабление излучения за счёт собственного поглощения материала сердцевины, и наличия в волокне посторонних примесей, за счёт рассеивания световой энергии на неоднородностях, обусловленных малыми по сравнению с длиной волны флуктуациями показателя преломления оптического волокна, за счет скрутки, деформации и изгибов оптического волокна при изготовлении оптического кабеля.

Измеряют, как правило, коэффициент полного затухания оптического световода по мощности α . Обычно α выражается в децибелах и определяется по формуле

$$\alpha = 10 \lg[(P_0 I_S / 1 - \rho^2) / P_L],$$

где P_0 - оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на входе волокна;

P_L - оптическая мощность, проходящая через площадь поперечного сечения на выходе волокна;

ρ - коэффициент отражения от входного торца волокна;

I_S - эффективность ввода излучения в оптический световод.

При согласованном вводе и выводе излучения, к чему обычно стремятся на практике, приходим к традиционной формуле

$$\alpha = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P_L} \right).$$

Измерение затухания оптического световода сложная научно-техническая задача. Однозначно определить коэффициент α трудно. На воспроизводимость результатов влияют микро- и макроизгибы, изменения температуры и давления, способ возбуждения оптического волокна. В многомодовых волокнах измерение осложняется распространением большого количества мод в волокне,

каждая из которых имеет собственные характеристики распространения. В связи с этим необходимыми условиями измерения затухания являются:

- 1) постоянство мощности оптического излучателя, его центральной длины волны λ и ширины спектра излучения $\Delta\lambda$, причем $\Delta\lambda$ не должна превышать характеристику спектрального затухания волокна;
- 2) неизменность модового состава оптического излучения, что позволяет избежать потерь мощности в многомодовых волокнах за счет быстро затухающих мод высшего порядка;
- 3) вывод мод оболочки, что позволяет избежать их влияния на мощность оптического сигнала на выходе волновода.

Первое условие - постоянство характеристик источника излучения – обеспечивается выбором излучателя.

Второе условие - неизменность модового состава оптического излучения – выполняется в многомодовых волокнах только при достижении равновесного распределения мод. Эффективная длина установления равновесного распределения мод в волокне может составлять от сотен метров до нескольких километров и зависит от типа волокна, способа возбуждения, микро- и макроизгибов. Для формирования распределения мод, близкого к равновесному в коротких отрезках волокна, широкое применение находят смесители и фильтры мод. Известно несколько конструкций фильтров мод: спиральный фильтр мод, который образуется несколькими витками световода (3-5 витков), намотанных на стержень диаметром 15-40 мм; система штырей - гребенка, через которую оптическое волокно пропускается с небольшим радиусом изгиба. Хорошей эффективностью обладает биконический фильтр, образованный двойным конусным переходом световода через меньший размер на прежние параметры. Такой фильтр можно создать перетяжкой разогретого волокна на диаметр 0,6 от номинального на длине 1-2 мм.

Общим для всех смесителей и фильтров мод является обеспечение условий для сильной связи мод различных порядков на вызываемых внешними причинами макроизгибах и микронеоднородностях волокна, достижение равной мощности излучения во всех модах и неизменность модового состава.

Третье условие - вывод мод оболочки – обеспечивается обычно иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой равен или больше показателя преломления оболочки.

Для однородного волокна в состоянии равновесия можно определить коэффициент затухания – затухание на единицу длины волокна (дБ/км):

$$\beta(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{L},$$

которое не зависит от выбранной длины волокна.

К настоящему времени согласно рекомендациям ГОСТ 26814-86 на практике применяются следующие методы измерения затухания: метод обламывания; безобломный метод (другое его название – метод вносимых потерь). Методы относятся к группе «точка-точка», при которых измеритель и источник

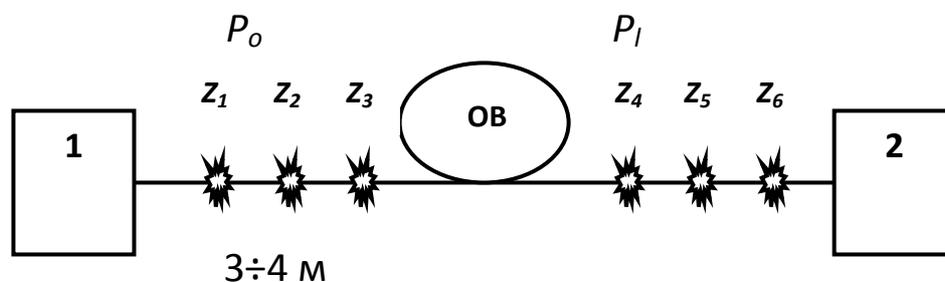
размещаются по разные стороны тестируемого объекта. Схема измерения затухания методом обламывания приведена на рис.2.2.

Измерение выполняется следующим образом. Сначала фиксируются показания измерителя мощности при подключении к источнику излучения тестируемого волокна. Затем при выключенном источнике производится обламывание волокна на расстоянии ~3-4 м от источника и фиксируется торец отрезка на входе измерителя мощности. При включении излучателя вновь фиксируются показания измерителя. Потери (дБ) определяются как разность между эталонным уровнем $\alpha_{\text{эт}}$ (на коротком отрезке) и уровнем измерения на всей длине волокне $\alpha_{\text{изм}}$:

$$\alpha = \alpha_{\text{эт}} - \alpha_{\text{изм}}$$

Для повышения точности при малом значении потерь измерение производят несколько раз, обламывая оптическое волокно в нескольких точках.

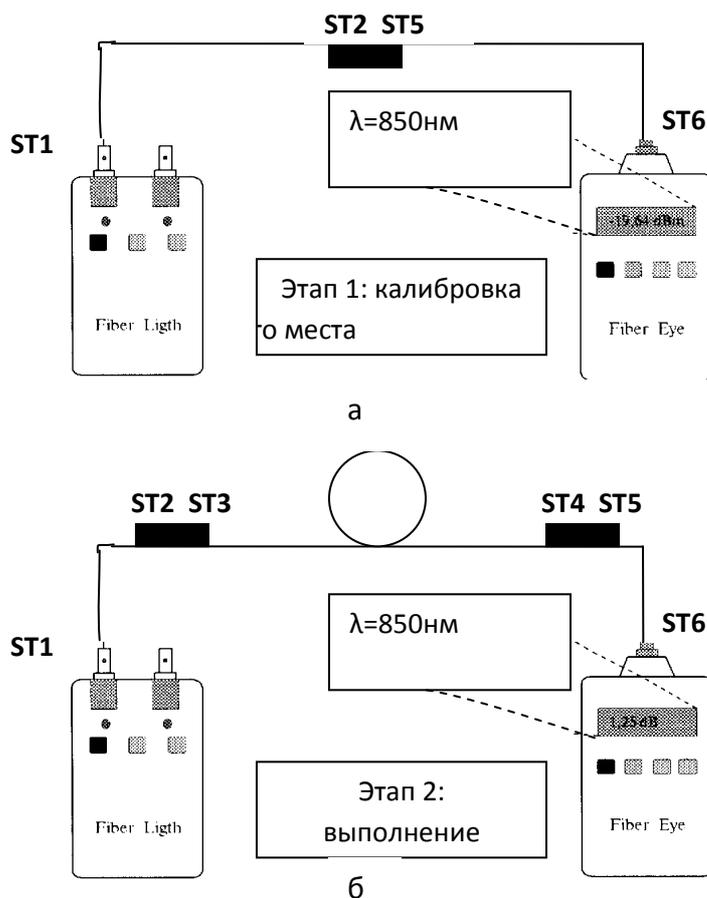
Если необходимо измерить значение удельного затухания β , то полученное затухание α делится на длину волокна.



Измерение затухания методом обламывания

Метод обламывания является наиболее точным методом измерения затухания, сравнительно прост, но из-за необходимости разрыва волокна его использование при настройке и техническом обслуживании ВОЛС в полевых условиях неэффективно. Поэтому он применяется только при производстве оптических волокон.

Схема измерения затухания методом вносимых потерь приведена на рис.2.3. Согласно этому методу измерения осуществляются в два этапа. На первом этапе (этап калибровки) производится измерение оптической мощности на выходе вспомогательного волокна (рис 2.3,а). Это может быть волокно того же типа, что и измеряемое, но длиной не более 2 м, чтобы можно было пренебречь его затуханием. На втором этапе, схема которого изображена на рис. 3.3,б, подсоединяется измеряемое волокно, и соединение регулируется по максимальному уровню мощности. Потери оптического излучения в волокне определяются как разность между эталонным уровнем мощности и уровнем второго измерения. Для увеличения точности измерения рекомендуется производить его в двух направлениях с усреднением полученного результата.



Измерение затухания методом вносимых потерь: а – этап калибровки; б – этап измерения

Метод вносимых потерь требует качественного соединения волокон и менее точен, чем предыдущий из-за погрешности, обусловленной непостоянством потерь в коннекторе при соединении кабелей. Однако этот метод не требует разрыва волокна и обычно используется в полевых условиях.

Отметим, что затухание оптического волокна, как и потери, вносимые в линию связи отдельными компонентами линии, есть всегда частное от деления двух уровней мощности. Поэтому при измерениях затухания или вносимых потерь точность измерения абсолютной мощности не важна. Важна погрешность определения отношения мощностей и, следовательно, в первую очередь необходима линейность характеристики фотоприемника.

Для определения затухания сигнала в кабельной системе линии и отдельных ее компонентах используются измерители оптических потерь (оптические тестеры). Оптическими тестерами называют приборы, в которых используются согласованные пары источник излучения – приемник (измеритель оптической мощности). Перечисленные в подразделе 2.4 приборы для измерения абсолютной мощности могут быть использованы и для измерения затухания.

Пример 2. Вопрос: Методы измерения длины волны отсечки одномодовых волокон

В оптическом волноводе могут распространяться два типа волн: симметричные E_{nm} и H_{nm} , у которых наряду с двумя поперечными имеется по одной продольной составляющей, и несимметричные волны, имеющие одновременно по две продольные составляющие, одна из которых EH_{nm} с преобладанием электрической составляющей, другая HE_{nm} с преобладанием магнитной составляющей. Индекс n здесь означает число перемен знака в поперечном распределении поля вдоль угловой координаты, индекс m – вдоль радиуса. Следует отметить, связывая электромагнитную теорию с лучевой теорией, что симметричные волны соответствуют меридианным лучам, а несимметричные – косым лучам.

Область существования каждой моды зависит от нормированной частоты оптического световода v :

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = \frac{2\pi R}{\lambda} NA,$$

где R – радиус сердцевинки; NA – числовая апертура; λ – длина распространяющейся световой волны.

Так как для оптических волокон радиус R сердцевинки, показатели преломления сердцевинки n_c и оболочки n_u имеют постоянные значения, область изменений нормированной частоты определяется изменением длины волны λ .

Среди направляемых мод особое положение занимает мода HE_{11} , у которой критическое значение нормированной частоты $v_{11} = 0$. Это основная (фундаментальная) мода ступенчатого оптического волокна, так как она распространяется при любой частоте света и любых структурных параметрах волокна. С точки зрения геометрической оптики, мода HE_{11} образуется лучом, вводимым вдоль оси волокна, так как только характеристики такого луча не зависят от условий отражения на границе “сердцевина - оболочка”. Именно при работе на этой моде волокно называют одномодовым. Выбирая параметры оптического волокна, можно получить режим распространения одной только моды HE_{11} , что реализуется при условии

$$v = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_u^2} < 2,405.$$

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется только одна фундаментальная мода, называется длиной волны отсечки. Значение длины волны отсечки определяется из выражения

$$\lambda_0 = 2\pi R \sqrt{n_c^2 - n_u^2} / 2,405.$$

Длина волны отсечки одномодового волокна определяет самую короткую длину световой волны, которую следует использовать. При более короткой длине световой волны $\lambda < \lambda_0$ в волокне будут распространяться и другие моды, которые принято называть высшими.

Измерение длины волны отсечки осуществляется двумя методами: методом передаваемой мощности и методом контроля диаметра модового пятна.

Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности основано на измерении мощности светового излучения на выходе волокна в зависимости от длины волны. В качестве модулированного источника излучения используется перестраиваемый по длине волны лазер с шириной спектра, не превышающей 10 нм.

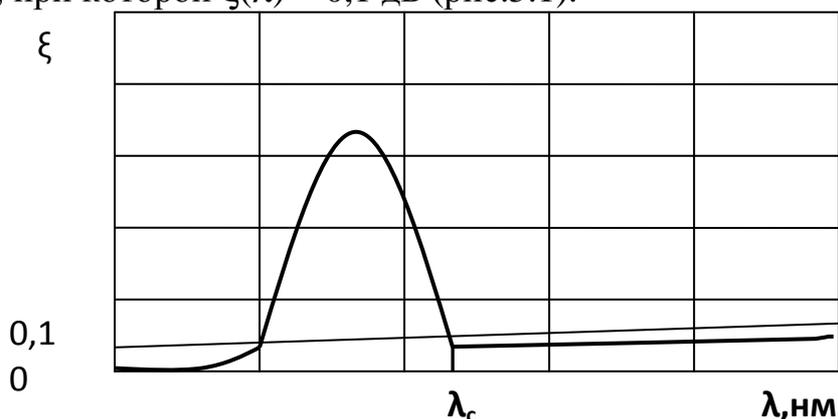
Метод заключается в сравнении сигнала, передаваемого по волокну небольшой длины, с образцовым сигналом, который получают на выходе либо испытываемого волокна, согнутого в кольцо диаметром менее 10 см (метод изгиба), либо многомодового волокна длиной от 1 до 2 м.

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе проводят измерение оптической мощности $P_1(\lambda)$ в испытываемом волокне небольшой длины (прямом либо слабо изогнутом). На втором этапе измеряют мощность $P_2(\lambda)$ на выходе испытываемого волокна, изогнутого меньшим радиусом, обычно составляющим 3 см, или мощность $P_3(\lambda)$ на выходе 1–2 м многомодового волокна. Выходную мощность регистрируют на каждой длине волны диапазона измерений, предположительно включающего длину волны отсечки. Отношение передаваемой мощности $P_1(\lambda)$ к $P_2(\lambda)$ или $P_1(\lambda)$ к $P_3(\lambda)$ рассчитывают согласно выражению

$$\xi = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)},$$

где $i = 2$ или 3 в зависимости от метода.

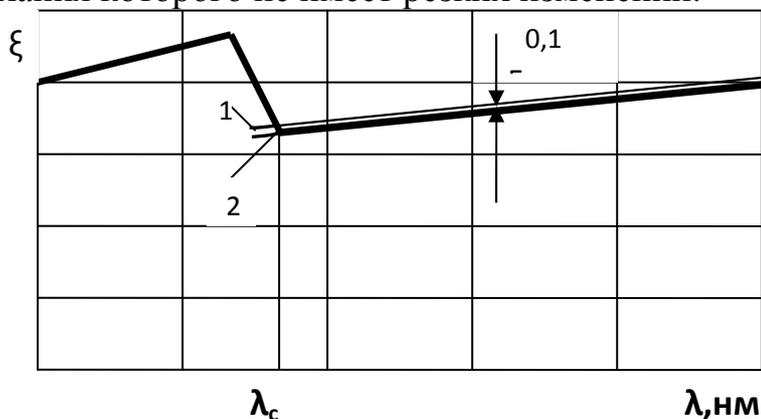
В первом методе длину волны отсечки λ_0 определяют по максимальной длине волны, при которой $\xi(\lambda) = 0,1$ дБ (рис.5.1).



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием одномодового волокна

Во втором методе длину волны отсечки λ_0 определяют при пересечении прямой 1, проведенной на 0.1 дБ выше линейного участка 2 кривой $\xi(\lambda)$ (рис.5.2).

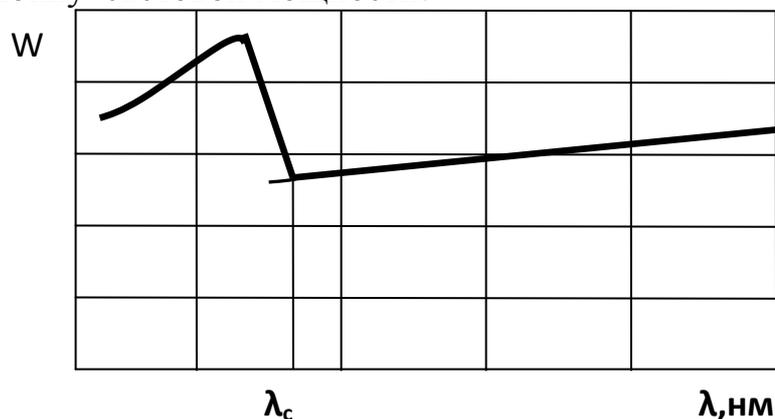
При переходе через длину волны, равную длине волны отсечки λ_0 , в обоих случаях происходит изменение пропускания волокна. В первом методе - сильно изогнутого одномодового волокна за счет рассеяния на изгибах по сравнению с прямым или слабо изогнутым волокном, во втором методе - прямого одномодового волокна по сравнению с многомодовым, спектральная зависимость затухания которого не имеет резких изменений.



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием многомодового волокна

Применение для измерений коротких образцов связано с необходимостью уменьшения до минимально возможного влияния микроизгибов, под действием которых длина волны отсечки перемещается в коротковолновую область.

Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра модового поля основано на зависимости диаметра модового пятна W от длины волны передаваемой по волокну световой мощности.



График, поясняющий метод измерения длины волны отсечки с использованием модового пятна

Процедура измерений включает два этапа. На первом этапе измеряется диаметр модового пятна на выходном торце волокна в зависимости от длины волны. На втором этапе строится график, отражающий зависимость диаметра модового пятна от длины волны, и определяется длина волны отсечки.

7. Контрольные этапы и их максимальный рейтинг

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 (раздел 8) и **итоговый** контроль.

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

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(Сумма _ баллов, _ набранная _ к _ КТx) * 5}{Требуемая _ сумма _ баллов _ по _ балльной _ раскладке}.$$

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.

Экзаменационный билет содержит два вопроса. Максимальная оценка за каждый вопрос составляет 15 баллов. Максимальная экзаменационная оценка составляет 30 баллов. Экзаменационная составляющая менее 10 баллов – не сдача экзамена, требует повторной пересдачи в установленном порядке.

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

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	3	3	3	9
Контрольные работы на практических занятиях		6	6	12
Выполнение индивидуальных заданий(выступление на семинарах)			10	10
Выполнение и защита результатов лабораторных работ		15	15	30
Компонент своевременности	3	3	3	9
Итого максимум за период:	6	27	37	70
Сдача экзамена (максимум)				30
Нарастающим итогом	6	43	70	100

Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

Пересчет итоговой суммы баллов в традиционную международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов (учитывает успешно сданный экзамен)	Оценка (ECTS)
5 (отлично)	90-100	A (отлично)
4 (хорошо)	85-89	B (очень хорошо)
	75-84	C (хорошо)
	70-74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно)	65-69	E(посредственно)
	60-64	
2(неудовлетворительно)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

Преобразование суммы баллов в традиционную оценку и в международную буквенную оценку происходит один раз в конце семестра после подведения итогов изучения дисциплины(успешной сдачи экзамена).

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи. М.: Эко-Трендз, 2006. - 268 с
2. Горлов Н.И. Метрологическое обеспечение и техническая эксплуатация телекоммуникационных систем./ Новосибирск: СибГУТИ, 2005.
3. Горлов Н.И., Минина Е.А. Методы и аппаратура измерения параметров систем и устройств связи оптического диапазона: учеб. пособие для вузов/ Новосибирск: СибГУТИ, 2005.-311 с.
4. А. В. Листвин, В. Н. Листвин Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.
5. Современные проблемы волоконно-оптических линий связи: Справочник. Т. 4: Активные элементы и средства контроля ВОЛС. Под ред. В. Ф. Мышкина, В. А. Хана, А. В. Шмалько. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2005г. -371 с.
6. Метрологическое обеспечение систем передачи: Учебное пособие для вузов. Б.П.Хромой, А.Л. Сенявский и др. под редакцией Б.П.Хромого. М., Радио и связь.1991 г.-392 с..
7. Бакланов И. Г. Технология измерений в современных телекоммуникациях. М.: ЭКО-ТРЭНДЗ, 1998. - 139 с.
8. Волоконно-оптические системы передачи: Учебное пособие для вузов. . М. М. Бутусов, С. М. Верник и др. М.: “Радио и связь”, 1992 г.-414 с.
9. А. Б. Иванов. Сравнительный анализ контрольно-измерительного оборудования ВОЛС. Вестник связи, № 1, 1998, с. 42-50.
- 10.Иванов А.Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Часть 1. - М.: Сайрус Системс, 2000. –376 с.
- 11.Шмалько А.В. Планирование и построение современных цифровых корпоративных сетей связи. – Вестник связи, 2000, №4, с. 58-65.
12. Шмалько А.В. Построение современных цифровых сетей связи: основные понятия, принципы и вопросы терминологии. – ВКСС. Connect! 2000, №2, с. 61-69.
13. Шмалько А.В., Сабинин Н.К. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. - ВКСС. Connect! 2000, №3, с. 50-62.
14. Симичев Н.И., Ермашов А.А., Шмалько А.В. Единая информационная сеть связи АО “Мосэнерго”. Рубежи и перспективы. - ИнформКурьер-Связь, 2000, №11, с. 47-50.
15. Колинко Т. Измерения в цифровых системах связи. Киев: Век+, НТИ, 2002, 320 с.
16. Правила проектирования, строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше. – М.: РАО “ЕЭС России”, 1999. –108 с.
17. Волоконно-оптическая техника; история, достижения, перспективы // Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2000. - 376 с.

18. Родомиров Л., Скопин Ю.Г., Иванов А.Б. Методы и оборудование удаленного тестирования ВОЛС. - Вестник связи, 1998, №5, с. 64-71.
19. Некрасов С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей. – Технологии и средства связи, 2000, №5, с. 28-32.
- 18 . Мандель А.Е. Методы и средства измерения в волоконно-оптических линиях связи: Уч. пособие. - Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2012. – 123 с. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/771>.

Перечень методических указаний по лабораторным работам

1. Измерение характеристик фотоприемного устройства [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Куш Г.Г., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2011. - 17 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/66>
2. Изучение оптического рефлектометра [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Куш Г.Г., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2011. - 14 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/67>
3. Изучение факторов, влияющих на информационно-пропускную способность волоконно-оптических линий связи [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Коханенко А.П., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск : ТУСУР, 2011. - 13 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/68>
4. Обработка рефлектограмм оптических волокон [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Куш Г.Г., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск : ТУСУР, 2011. - 19 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/69>
5. Лабораторная установка для сварки оптических волокон и контроля качества сварки [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Куш Г.Г., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и

квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2011. - 29 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/70>

6. Измерения затухания оптических волокон оптическим тестером [Электронный ресурс]: Руководство к лабораторной работе / Куц Г.Г., Мандель А.Е. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск), Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2011. - 18 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/71>

Учебное издание

Мандель Аркадий Евсеевич

**Метрология в оптических
телекоммуникационных системах**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и
организации самостоятельной работы студентов специальности
210401 «Физика и техника оптической связи»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.

634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.