

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие к третьему изданию</b> . . . . .	19
<b>1. История отечественной волоконно-оптической техники</b> . . . . .	21
1.1. История развития волоконной оптики . . . . .	21
1.2. История ООО "Волоконно-оптическая техника" . . . . .	21
Литература к главе 1. . . . .	24
<b>2. Оптическое волокно как среда передачи</b> . . . . .	25
2.1. Основные понятия, связанные с оптическим волокном . . . . .	25
2.1.1. Физические понятия . . . . .	25
2.1.2. Другие важные особенности . . . . .	26
2.2. Свойства волокна, основанные на законах геометрической оптики . . . . .	27
2.2.1. Полное внутреннее отражение . . . . .	27
2.2.2. Числовая апертура. . . . .	28
2.3. Свойства волокна, основанные на законах электромагнитного поля . . . . .	28
2.3.1. Моды колебаний . . . . .	28
2.3.2. Частота отсечки и нормированная частота моды . . . . .	30
2.3.3. Диаметр модового поля . . . . .	31
2.3.4. Число мод многомодового волокна . . . . .	31
2.4. Профиль изменения показателя преломления . . . . .	32
2.5. Основные характеристики оптических потерь волокна . . . . .	33
2.5.1. Общая функция потерь . . . . .	33
2.5.2. Рэлеевское рассеяние . . . . .	34
2.5.3. Поглощение на примесях . . . . .	34
2.5.4. Потери на изгибах и макронеоднородностях . . . . .	34
2.6. Основные характеристики искажений оптического сигнала . . . . .	34
2.6.1. Дисперсия . . . . .	35
2.6.1.1. Модовая дисперсия . . . . .	35
2.6.1.2. Материальная дисперсия . . . . .	35
2.6.1.3. Волноводная дисперсия . . . . .	36
2.6.1.4. Поляризационная модовая дисперсия . . . . .	38
2.6.2. Методы компенсации дисперсии . . . . .	39
2.6.2.1. Использование волокон с низкой дисперсией . . . . .	39
2.6.2.2. Создание модулей компенсации дисперсии . . . . .	39
2.6.2.3. Использование метода управляемой дисперсии . . . . .	40
2.6.2.4. Метод электронной компенсации дисперсии . . . . .	40
2.6.2.5. Метод оптической компенсации дисперсии. . . . .	41
2.7. Нелинейные эффекты в оптическом волокне . . . . .	42
2.7.1. Нелинейное преломление, ФСМ и ФКМ . . . . .	42
2.7.2. Вынужденное неупругое рассеяние . . . . .	43
2.7.3. Модуляционная неустойчивость . . . . .	44
2.7.4. Четырехволновое смешение . . . . .	44
2.8. Оптические солитоны . . . . .	46
2.8.1. Физика солитонов . . . . .	47
2.8.2. Методы формирования солитонов . . . . .	48
Литература к главе 2. . . . .	49
<b>3. Основы волоконно-оптических систем передачи</b> . . . . .	51
3.1. Основные особенности ВОСП . . . . .	51
3.1.1. Особенности канала связи . . . . .	51
3.1.2. Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму . . . . .	53
3.1.3. Блок-схема канала передачи. . . . .	53
3.1.4. Кодирование потока данных в линии связи . . . . .	54

3.2. Методы мультиплексирования потоков данных . . . . .	56
3.2.1. Временное мультиплексирование. . . . .	56
3.2.1.1. Временное мультиплексирование двоичных потоков данных . . . . .	57
3.2.1.2. Параметры стандартных ИКМ систем . . . . .	57
3.2.1.3. Система СЕРТ. Форматы фрейма и мультифрейма. . . . .	58
3.2.2. Волновое мультиплексирование . . . . .	58
3.3. Обзор используемых цифровых технологий ВОСП . . . . .	59
3.3.1. Особенности технологии PDH . . . . .	59
3.3.1.1. Схемы плезиохронной цифровой иерархии . . . . .	59
3.3.1.2. Общие особенности плезиохронных цифровых иерархий. . . . .	61
3.3.1.3. Недостатки плезиохронной цифровой иерархии . . . . .	62
3.3.1.4. Необходимость разработки синхронной иерархии . . . . .	62
3.3.2. Особенности технологии SDH . . . . .	63
3.3.2.1. Особенности построения иерархии SDH . . . . .	64
3.3.2.2. Обобщенная схема мультиплексирования потоков SDH . . . . .	66
3.3.2.3. Виртуальные контейнеры и другие элементы SDH . . . . .	67
3.3.2.4. Архитектура сетей SDH. . . . .	67
3.3.3. Стандартные оптические интерфейсы . . . . .	69
3.3.4. Современные достижения систем SDH. . . . .	72
3.4. Применение солитонных технологий в ВОСП . . . . .	74
3.4.1. Экспериментальные солитонные линии связи . . . . .	74
3.4.2. Перспективы использования солитонных линий связи. . . . .	75
3.4.2.1. Перспективы повышения скорости передачи на одной несущей . . . . .	75
3.4.2.2. Перспективы увеличения длины регенерационного участка . . . . .	76
3.4.2.3. Перспективы использования существующих ОК для создания СЛС . . . . .	76
Литература к разделам 3.1–3.4 . . . . .	78
3.5. Основы технологии WDM. . . . .	79
3.5.1. Основные принципы WDM . . . . .	79
3.5.1.1. Модель взаимодействия WDM с транспортными технологиями . . . . .	80
3.5.2. Блок-схема систем WDM . . . . .	81
3.5.3. Классификация оптических интерфейсов систем WDM . . . . .	81
3.5.3.1. Классификация эталонных точек оптических интерфейсов . . . . .	81
3.5.3.2. Классификация однопролетных и многопролетных оптических секций . . . . .	82
3.5.4. Частотный/волновой план систем WDM . . . . .	84
3.5.4.1. Стандартный частотный план . . . . .	85
3.5.4.2. Расширенный частотный план . . . . .	86
3.5.5. Классификация систем WDM. . . . .	87
3.5.5.1. Разреженные, обычные, плотные и высокоплотные системы WDM . . . . .	87
3.5.6. Особенности разреженных систем WDM (CWDM). . . . .	87
3.5.6.1. Гибридная модель частотного/волнового плана . . . . .	88
3.5.6.2. Анализ альтернатив использования CWDM и DWDM . . . . .	89
3.5.7. Промышленные системы WDM . . . . .	90
3.5.7.1. Особенности систем WDM для городских сетей . . . . .	90
3.5.7.2. Промышленные мультиплексоры WDM. . . . .	90
3.5.7.3. Основные параметры промышленных систем WDM . . . . .	92
Список основных параметров систем WDM . . . . .	92
Система DWDM "Пуск" компании НТО "ИРЭ Полюс" . . . . .	93
Мультисервисная платформа компании Ericsson. . . . .	95
3.5.8. Проблемы и перспективы использования WDM . . . . .	95
3.5.8.1. Перспективы использования WDM . . . . .	95
3.5.8.2. Проблемы при реализации WDM . . . . .	96
Литература к разделу 3.5 . . . . .	97

3.6. Методы синхронизация потоков цифровых данных . . . . .	98
3.6.1. Основные типы синхронизации и связанные с ними понятия . . . . .	98
3.6.2. Основные схемы управления в сетях ТСС . . . . .	99
3.6.2.1. Основные определения типов источников . . . . .	100
3.6.2.2. Точностные параметры и основные ошибки эталонных источников . . . . .	101
3.6.2.3. Определение некоторых основных ошибок . . . . .	102
3.6.2.4. Стандартные сигналы, используемые для целей синхронизации . . . . .	103
3.6.2.5. Стандартные режимы работы источника синхронизации . . . . .	103
3.6.3. Общее решение задачи синхронизации . . . . .	103
3.6.4. Классы и характеристики хранирующих источников . . . . .	104
3.6.4.1. Оборудование, используемое для синхронизации сети . . . . .	105
3.6.4.2. Спутниковые системы и датчики точного времени . . . . .	105
3.6.5. Проектирование сетей ТСС . . . . .	106
3.6.5.1. Особенности синхронизации цифровых сетей SDH . . . . .	107
3.6.5.2. Источники синхронизации сетей SDH . . . . .	108
3.6.5.3. Качество храниющего источника . . . . .	108
3.6.6. Примеры реализации сетей ТСС . . . . .	109
3.6.6.1. Система ТСС цифровой сети ОАО "Ростелеком" . . . . .	109
Классы подключения к Базовой сети ТСС . . . . .	110
Процедура подключения к Базовой сети ТСС . . . . .	110
3.6.6.2. Система ТСС цифровой сети ЗАО "Транстелеком" . . . . .	110
Литература к разделу 3.6 . . . . .	111
<b>4. Активные оптоэлектронные компоненты ВОСП . . . . .</b>	<b>112</b>
4.1. Источники оптического излучения . . . . .	112
4.1.1. Полупроводниковые лазеры . . . . .	112
4.1.1.1. Инверсия населенности и оптическое усиление в полупроводниках . . . . .	112
4.1.2. Лазеры для ВОЛС . . . . .	113
4.1.3. Технология изготовления п/п лазеров . . . . .	114
4.1.4. Основные характеристики лазеров . . . . .	117
4.1.5. Температурная зависимость параметров п/п лазеров . . . . .	123
4.1.5.1. Температурное изменение пороговых характеристик ИЛ . . . . .	123
4.1.5.2. Способы уменьшения температурного роста порога генерации . . . . .	123
4.1.6. Передающие оптические модули . . . . .	124
4.1.6.1. Лазерные модули с фиксированной длиной волны . . . . .	125
4.1.6.2. Перестраиваемые полупроводниковые лазеры . . . . .	130
4.2. Типы и параметры промышленных ПОМ и ПрОМ . . . . .	135
4.2.1. Некоторые типы и параметры зарубежных промышленных ПОМ . . . . .	138
4.2.2. Модуляторы полупроводниковых лазеров . . . . .	139
4.2.3. Светодиоды и суперлюминесцентные диоды . . . . .	139
4.2.3.1. Светоизлучающие диоды . . . . .	139
4.2.3.2. ПОМ на основе торцевых светодиодов . . . . .	141
4.2.3.3. Суперлюминесцентные диоды . . . . .	142
4.2.4. Приемники оптического излучения (ПрОМ) . . . . .	142
4.2.4.1. Типы и параметры промышленных ПрОМ отечественного производства . . . . .	143
4.2.4.2. Типы и параметры промышленных ПрОМ зарубежного производства . . . . .	145
4.2.5. Полупроводниковые оптические усилители . . . . .	145
4.2.5.1. Реализация п/п оптических усилителей . . . . .	147
Литература к разделам 4.1–4.2 . . . . .	148
4.3. Оптические усилители . . . . .	149
4.3.1. Введение . . . . .	149

4.3.2. Основные особенности оптических усилителей . . . . .	149
4.3.2.1. Принцип действия оптического усилителя . . . . .	150
4.3.2.2. Коэффициент усиления среды и усилителя . . . . .	151
4.3.2.3. Мощность насыщения $P_n$ . . . . .	151
4.3.2.4. Источники шума и динамический диапазон . . . . .	153
4.3.3. Полупроводниковые оптические усилители . . . . .	153
4.3.3.1. Принцип действия ПОУ . . . . .	153
4.3.3.2. Типы ПОУ . . . . .	154
4.3.3.3. Характеристики ПОУ . . . . .	155
4.3.3.4. Применение ПОУ . . . . .	156
4.3.4. Оптические усилители, использующие нелинейные явления в ОВ . . . . .	156
4.3.4.1. Волоконные ВКР-усилители, или усилители Рамана . . . . .	157
4.3.4.2. Широкополосные усилители Рамана . . . . .	158
4.3.4.3. Волоконные ВРМБ-усилители . . . . .	159
4.3.4.4. Параметрические усилители . . . . .	159
4.3.5. Оптические усилители на ОВ, легированном РЗЭ . . . . .	159
4.3.5.1. Принцип работы ОУ на легированном ОВ . . . . .	160
4.3.5.2. Усилители для окна 1300 нм . . . . .	160
4.3.5.3. Усилители для окна 1550 нм . . . . .	160
4.3.6. Практическая реализация оптических усилителей . . . . .	162
4.3.6.1. Реализация усилителей типа EDFA . . . . .	163
4.3.7. Схемы и параметры промышленных оптических усилителей . . . . .	165
4.3.7.1. Разработка широкополосных оптических усилителей EDFA . . . . .	167
4.3.7.2. Реализация иттербиевых оптических усилителей . . . . .	169
Литература к разделу 4.3 . . . . .	169
4.4. Оптическая коммутация и кросс-коммутаторы . . . . .	170
4.4.1. Основные параметры коммутаторов . . . . .	170
4.4.2. Типы базовых оптических кросс-коммутаторов . . . . .	171
4.4.2.1. Механические оптические коммутаторы . . . . .	171
4.4.2.2. Электрооптические (акустооптические) коммутаторы . . . . .	172
4.4.2.3. Термооптические коммутаторы . . . . .	173
4.4.2.4. Оптоэлектронные коммутаторы на основе ПОУ . . . . .	174
4.4.2.5. Интегральные активно-волноводные коммутаторы . . . . .	174
4.4.2.6. Коммутаторы на фотонных кристаллах . . . . .	176
4.4.2.7. Коммутаторы на многослойных световодных ЖК-матрицах . . . . .	177
4.4.2.8. Коммутаторы на матрицах вентилей, коммутируемых лазерным лучом . . . . .	178
4.4.2.9. Коммутаторы на основе массива микрзеркал MEMS . . . . .	179
4.4.2.10. Голографические коммутаторы . . . . .	181
4.4.3. Многокаскадные оптические коммутаторы . . . . .	182
4.4.3.1. Логика коммутации БПЭ размера 2x2 . . . . .	183
4.4.3.2. Древовидные сети типа Баньян . . . . .	183
4.4.4. Особенности построения многокаскадных оптических коммутаторов . . . . .	185
4.4.4.1. Схема матричного кросс-коммутатора . . . . .	187
4.4.4.2. Схема КСС Бенеша . . . . .	187
4.4.4.3. Схема КСС Шпанке-Бенеша . . . . .	188
4.4.4.4. Схема КСС Шпанке . . . . .	188
Литература к разделу 4.4 . . . . .	189
4.5. Оптические волновые конверторы . . . . .	190
4.5.1. Типы волновых конверторов . . . . .	191
4.5.1.1. Оптоэлектронные конверторы . . . . .	191
4.5.1.2. Конверторы на основе оптической перекрестной модуляции . . . . .	192
4.5.1.3. Конверторы на основе эффекта ЧВС . . . . .	193

4.5.1.4. Конверторы на основе других модуляционных нелинейных эффектов . . . . .	193
4.5.1.5. Конверторы на эффекте сдвига частоты солитона в нелинейном волокне . . . . .	195
4.6. Оптические модуляторы . . . . .	196
4.6.1. Форматы линейных кодов . . . . .	196
4.6.2. Методы модуляции оптической несущей . . . . .	197
4.6.2.1. Непосредственная модуляция оптической несущей . . . . .	198
4.6.2.2. Модуляция с использованием внешнего модулятора . . . . .	199
4.6.3. Типы оптических модуляторов . . . . .	199
4.6.3.1. Акустооптические модуляторы . . . . .	200
4.6.3.2. Электрооптические модуляторы . . . . .	201
4.6.3.3. Электрооптические модуляторы, использующие ПОУ . . . . .	203
4.7. Оптические мультиплексоры ввода/вывода . . . . .	203
4.7.1. Структура оптических мультиплексоров первого поколения . . . . .	203
4.7.2. Структура оптических мультиплексоров второго поколения . . . . .	205
4.7.3. Оптические фильтры в технологии ввода-вывода несущих . . . . .	206
4.7.3.1. Основные требования, предъявляемые к фильтрам . . . . .	206
4.7.3.2. Фильтры на основе оптоволоконных решеток Брэгга . . . . .	206
4.7.3.3. Фильтры на основе резонатора Фабри-Перо . . . . .	207
4.7.3.4. Интерференционные фильтры на тонких пленках . . . . .	209
4.7.3.5. Перестраиваемые фильтры на распределенных брэгговских отражателях . . . . .	210
4.7.3.6. Поляризационные фильтры на жидких кристаллах . . . . .	211
4.7.3.7. Акустооптические перестраиваемые фильтры . . . . .	211
4.8. Оптические мультиплексоры/демультиплексоры систем WDM . . . . .	212
4.8.1. Технология мультиплексирования на основе интерференционных фильтров . . . . .	213
4.8.2. Технология демультиплексирования, использующая угловую дисперсию. . . . .	213
4.8.3. Современные технологии демультиплексирования . . . . .	214
4.8.3.1. Технология, использующая дифракционную решетку на AWG. . . . .	214
4.8.3.2. Технология самофокусировки с вогнутым зеркалом и плоской решеткой . . . . .	217
4.8.3.3. Сравнение технологий оптического мультиплексирования . . . . .	217
Литература к разделам 4.5–4.8 . . . . .	218
<b>5. Пассивные оптические компоненты ВОСП . . . . .</b>	<b>220</b>
5.1. Оптические разветвители . . . . .	220
5.1.1. Назначение и типы оптических разветвителей . . . . .	220
5.1.2. Терминология и вопросы стандартизации разветвителей . . . . .	221
5.1.3. Параметры оптических разветвителей . . . . .	222
5.1.4. Технология изготовления оптических разветвителей . . . . .	226
5.1.4.1. Технология изготовления сплавных разветвителей . . . . .	227
5.1.4.2. Технология изготовления планарных разветвителей . . . . .	228
5.1.5. Конструкция оптических разветвителей . . . . .	229
5.1.5.1. Конструкция сплавных разветвителей . . . . .	229
5.1.5.2. Конструкция планарных разветвителей . . . . .	231
5.1.5.3. Модульные конструкции разветвителей . . . . .	231
5.1.6. Применение оптических разветвителей . . . . .	232
5.1.6.1. Использование разветвителей в ЛС, сетях доступа и КТВ . . . . .	233
5.1.6.2. Использование разветвителей в датчиках . . . . .	234
5.1.6.3. Использование разветвителей в качестве мультиплексоров. . . . .	235
5.1.6.4. Использование разветвителей в качестве аттенюаторов . . . . .	236
5.2. Оптические аттенюаторы . . . . .	237
5.2.1. Фиксированные аттенюаторы . . . . .	238

5.2.2. Переменные аттенюаторы . . . . .	238
5.2.3. Фиксированные аттенюаторы-FM-адаптеры . . . . .	239
5.2.4. Переменные аттенюаторы-FM-адаптеры . . . . .	239
Литература к разделам 5.1–5.2 . . . . .	240
5.3. Оптические изоляторы, решетки и циркуляторы . . . . .	241
5.3.1. Оптические изоляторы . . . . .	241
5.3.2. Оптические циркуляторы . . . . .	242
5.3.3. Дифракционные решетки . . . . .	243
5.3.3.1. Дифракция света . . . . .	243
5.3.3.2. Классические дифракционные решетки . . . . .	244
5.3.3.3. Синусоидальная дифракционная решетка . . . . .	245
5.3.3.4. Дифракционные решетки Брэгга . . . . .	246
5.3.3.5. Особенности оптоволоконных дифракционных решеток Брэгга . . . . .	247
5.3.3.6. Чирп-решетки Брэгга для компенсации дисперсии . . . . .	248
Литература к разделу 5.3 . . . . .	248
5.4. Разъемные оптические соединители . . . . .	249
5.4.1. Общие положения . . . . .	249
5.4.2. Основные параметры оптических соединителей . . . . .	250
5.4.2.1. Вносимые потери . . . . .	250
5.4.2.2. Возвратные потери . . . . .	255
5.4.2.3. Потери, вызванные PMD . . . . .	256
5.4.3. Методы измерения основных параметров оптических соединителей . . . . .	257
5.4.3.1. Геометрия торца наконечника ОС . . . . .	257
5.4.3.2. Определение величины вносимых и возвратных потерь ОС . . . . .	258
5.4.3.3. Тест на термическое старение . . . . .	259
5.4.3.4. Термоциклирование . . . . .	259
5.4.3.5. Тест на активное старение . . . . .	260
5.4.3.6. Тест на воздействие влаги и конденсата . . . . .	260
5.4.3.7. Тест на воздействие вибрации . . . . .	260
5.4.3.8. Тест на изгиб (качание) . . . . .	260
5.4.3.9. Тест на кручение . . . . .	260
5.4.3.10. Тест на усилие удержания ОК в корпусе ОС . . . . .	260
5.4.3.11. Тест на износостойкость ОС . . . . .	261
5.4.3.12. Испытание на удар . . . . .	261
5.4.4. Конструкция одноконтактного ОС . . . . .	261
5.4.5. Виды оптических разъемов . . . . .	266
5.4.5.1. ОР с керамическим наконечником Ø2,5 мм . . . . .	266
5.4.5.2. Новые типы ОС . . . . .	269
5.4.5.3. Разъемы без наконечников . . . . .	269
5.4.5.4. Многополюсные оптические разъемы . . . . .	270
5.4.5.5. Разъемы для ОВ с большим диаметром сердцевины . . . . .	270
5.5. Механические ОС, адаптеры и кабельные сборки . . . . .	270
5.5.1. Механические оптические соединители . . . . .	271
5.5.1.1. Соединители Corelink . . . . .	271
5.5.1.2. Механические соединители типа сплайсов . . . . .	271
5.5.2. Адаптеры для оптического волокна . . . . .	271
5.5.2.1. Адаптеры для оголенного волокна . . . . .	271
5.5.2.2. Приборные FM-адаптеры . . . . .	272
5.5.3. Соединительные и переходные розетки . . . . .	272
5.5.3.1. Соединительные розетки . . . . .	272
5.5.3.2. Переходные розетки . . . . .	273
5.5.4. Коммутационные шнуры . . . . .	273
5.5.4.1. Коммутационные шнуры со смещенным вводом оптического излучения . . . . .	273

5.5.4.2. Соединительные шнуры . . . . .	274
5.5.4.3. Соединительные полувилки . . . . .	274
5.5.4.4. Дуплексные шнуры . . . . .	274
5.5.4.5. Многоволоконные кабельные шнуры . . . . .	274
5.5.4.6. Многоволоконные полувилки . . . . .	275
5.5.5. Кабельные (претерминированные) сборки . . . . .	275
5.5.6. Вставки ремонтные оптические. . . . .	277
5.6. Сварное соединение оптических волокон. . . . .	282
5.6.1. Процессы сварки ОВ и используемое оборудование . . . . .	283
5.6.1.1. Удаление защитного покрытия . . . . .	283
5.6.1.2. Скол торца оптического волокна . . . . .	284
5.6.1.3. Юстировка и сварка оптических волокон . . . . .	286
5.6.2. Оценка качества сварного соединения . . . . .	293
5.6.2.1. Внутренние потери волокна . . . . .	293
5.6.2.2. Внешние потери волокна при сварке . . . . .	294
5.6.3. Методы защиты мест сварных соединений . . . . .	295
Литература к разделам 5.4–5.6 . . . . .	296
5.7. Соединительные муфты для оптических кабелей. . . . .	296
5.7.1. Конструкции оптических муфт. . . . .	298
5.7.2. Оптические муфты производства компании "ССД" . . . . .	299
5.7.2.1. Городские оптические муфты типа МОГ . . . . .	299
5.7.2.2. Магистральные муфты типа МТОК . . . . .	301
5.7.2.3. Универсальные муфты типа МТОК . . . . .	304
5.7.2.4. Магистральные муфты типа МОПГ-М. . . . .	305
5.7.3. Кассеты для выкладки ОВ для муфт и кроссов компании "ССД" . . . . .	307
5.7.3.1. Особенности кассет компании "ССД". . . . .	307
5.7.3.2. Кассеты для муфт типа МОГ . . . . .	307
5.7.3.3. Кассеты для муфт типа МТОК. . . . .	308
5.7.4. Кабельные муфты других производителей . . . . .	308
5.7.5. Кассеты для выкладки ОК других производителей . . . . .	312
5.7.6. Защитные гильзы КДЗС. . . . .	314
5.7.7. Расчетная надежность муфт . . . . .	315
Литература к разделу 5.7 . . . . .	316
<b>6. Характеристики промышленных оптических волокон и кабелей . . . . .</b>	<b>318</b>
6.1. Классификация типов промышленных оптических волокон . . . . .	318
6.1.1. Классификация многомодовых волокон . . . . .	319
6.1.2. Классификация одномодовых волокон . . . . .	320
6.1.3. Классификация волокон по профилю показателя преломления . . . . .	320
6.1.4. Классификация волокон по характеристике дисперсии . . . . .	320
6.1.5. Классификация специальных типов волокон . . . . .	320
6.2. Характеристики промышленных оптических волокон . . . . .	321
6.2.1. Основные параметры многомодовых волокон . . . . .	321
6.2.2. Основные параметры одномодовых волокон . . . . .	323
6.2.2.1. ОМ ОВ, регламентируемые стандартами ИТУ-Т . . . . .	323
6.2.2.2. Параметры промышленных ОМ ОВ . . . . .	325
6.2.3. Рекомендации по применению волокон в системах связи . . . . .	329
6.2.4. Оптическое волокно для компенсации дисперсии . . . . .	330
6.2.5. Оптическое волокно, сохраняющее состояние поляризации . . . . .	332
6.2.6. Оптические волокна, основанные на новых технологиях . . . . .	332
6.2.6.1. Брэгговское волокно. . . . .	333
6.2.6.2. Фотонные кристаллы . . . . .	334
6.2.6.3. Фотонно-кристаллическое волокно . . . . .	335
6.2.6.4. Свойства и параметры РСФ. . . . .	338
6.2.6.5. Применение фотонно-кристаллических волокон . . . . .	338

6.3. Типы и характеристики промышленных ОК. . . . .	339
6.3.1. Классификация типов ОК. . . . .	339
6.3.1.1. Кабели внутренней прокладки . . . . .	340
6.3.1.2. Кабели наружной прокладки. . . . .	340
6.3.1.3. Специальные кабели . . . . .	341
6.3.2. Типовые конструкции ОК . . . . .	341
6.3.3. Основные параметры промышленных ОК . . . . .	343
6.3.3.1. Назначение и область применения ОК. . . . .	348
6.3.4. Оптические кабели воздушной подвески . . . . .	349
6.3.4.1. Кабели, использующие грозотрос . . . . .	349
6.4. Маркировка оптических кабелей . . . . .	350
Литература к главе 6. . . . .	350
<b>7. Методы измерения параметров оптических компонентов . . . . .</b>	<b>353</b>
7.1. Измерение оптической мощности, затухания и потерь . . . . .	353
7.1.1. Измерение оптической мощности. . . . .	353
7.1.1.1. Измерители мощности с термофотодиодами . . . . .	353
7.1.1.2. Измерители мощности с фотодиодами . . . . .	355
7.1.1.3. Измерение мощности на выходе оптических волокон. . . . .	358
7.1.1.4. Измерение абсолютной мощности. . . . .	359
7.1.1.5. Основные параметры измерителей средней мощности . . . . .	361
7.1.2. Измерение затухания ВОЛС . . . . .	362
7.1.2.1. Измерение затухания методом обрыва . . . . .	363
7.1.2.2. Измерение затухания методом вносимых потерь . . . . .	364
7.1.2.3. Измерение затухания на двух длинах волн . . . . .	364
7.1.2.4. Измерение приращения затухания от воздействия внешних факторов . . . . .	365
7.1.2.5. Измерение переходного затухания оптического кабеля . . . . .	365
7.1.3. Измерение вносимых потерь. . . . .	366
7.1.3.1. Общий метод измерения вносимых потерь . . . . .	366
7.1.3.2. Измерение потерь на одной длине волны . . . . .	370
7.1.3.3. Измерение PDL . . . . .	372
7.2. Методы измерения оптических параметров волокна и кабеля . . . . .	375
7.2.1. Измерение длины волны отсечки . . . . .	375
7.2.1.1. Измерение длины волны отсечки методом передаваемой мощности . . . . .	375
7.2.1.2. Измерение длины волны отсечки методом контроля диаметра поля моды . . . . .	376
7.2.2. Измерение ширины полосы пропускания . . . . .	377
7.2.2.1. Измерение полосы пропускания импульсным методом . . . . .	377
7.2.2.2. Измерение полосы пропускания частотным методом . . . . .	378
7.2.3. Измерение геометрических и механических характеристик оптических волокон. . . . .	378
7.3. Измерение параметров активных и пассивных оптических компонентов . . . . .	379
7.3.1. Измерение модуляционных характеристик и шумов источника излучения . . . . .	379
7.3.1.1. Измерение модуляционной характеристики внешнего модулятора . . . . .	379
7.3.1.2. Измерение шумов оптического излучения. . . . .	379
7.3.2. Измерение параметров оптических усилителей и других активных элементов . . . . .	381
7.3.2.1. Измерение параметров оптических усилителей . . . . .	381
7.3.2.2. Измерение усиления в WDM системах. . . . .	382
Литература к главе 7. . . . .	384
<b>8. Методы оценки и измерения показателей ошибок ВОСП . . . . .</b>	<b>385</b>
8.1. Схема тракта ВОСП для оценки показателей ошибок . . . . .	385



8.1.1. Эталонный тракт для каналов со скоростью, меньшей E1 . . . . .	386
8.1.2. Эталонный тракт для каналов со скоростью, большей E1 . . . . .	386
8.1.3. Спутниковый и наземный каналы передачи данных . . . . .	387
8.2 Типы показателей ошибок . . . . .	388
8.3. Методы оценки показателей ошибок на основе BER . . . . .	391
8.3.1. Использование вероятностных оценок BER – BEP . . . . .	392
8.3.1.1. Маска BEP . . . . .	393
8.4. Процедура расчета показателей ошибок на основе ES и SES . . . . .	395
8.4.1. Мониторинг показателей ошибок в реальных системах . . . . .	397
8.4.2. Примеры расчета показателей ошибок . . . . .	398
8.4.3. Новые термины и понятия, применяемые для оценки показателей ошибок	400
Литература к разделам 8.1–8.4 . . . . .	401
8.5. Измерение показателей ошибок . . . . .	402
8.5.1. Измерение коэффициента ошибок BER . . . . .	402
8.5.1.1. Телекоммуникационные BER-тестеры с кодированными интерфейсами . . . . .	402
8.5.1.2. Техника измерения коэффициента ошибок . . . . .	403
8.5.1.3. Примеры измерений с использованием тестирования по BER . . . . .	404
8.5.2. Измерение дрейфа и дрожания фазы . . . . .	407
8.5.2.1. Виды дрейфа и дрожания фазы . . . . .	407
8.5.2.2. Нормы на дрейф и дрожание фазы . . . . .	408
8.5.2.3. Методы измерения дрожания фазы . . . . .	411
8.5.2.4. Техника измерения и тестирования дрожания фазы . . . . .	413
Литература к разделу 8.5 . . . . .	414
<b>9. Строительство и эксплуатация ВОЛС . . . . .</b>	<b>415</b>
9.1. Подготовка к строительству (организационные мероприятия) . . . . .	415
9.2. Прокладка оптического кабеля . . . . .	416
9.2.1. Прокладка оптического кабеля в грунт . . . . .	416
9.2.1.1. Прокладка кабеля в отрытую траншею . . . . .	417
9.2.1.2. Прокладка кабеля бестраншейным способом . . . . .	418
9.2.1.3. Прокладка ОК в грунт в защитных полиэтиленовых трубах . . . . .	421
9.2.2. Прокладка ОК в кабельной канализации . . . . .	424
9.2.3. Прокладка ОК через водные преграды . . . . .	428
9.2.3.1. Прокладка ОК через водные преграды ножевым кабелеукладчиком . . . . .	428
9.2.3.2. Прокладка ОК с плавсредств в готовую траншею . . . . .	429
9.2.3.3. Прокладка ОК через водные преграды по мостам . . . . .	430
9.3. Подвеска волоконно-оптического кабеля . . . . .	430
9.4. Ввод ВОЛС в эксплуатацию . . . . .	439
9.4.1. Рабочая комиссия . . . . .	439
9.4.2. Приемочная комиссия . . . . .	439
9.4.3. Приемочные испытания и измерение элементарных кабельных участков ВОЛС . . . . .	440
9.5. Эксплуатация ВОЛС . . . . .	441
9.5.1. Общие вопросы эксплуатации ВОЛС . . . . .	441
9.5.2. Эксплуатационный контроль параметров и характеристик ВОЛС . . . . .	442
9.5.3. Аварийно-восстановительные работы на ВОЛС . . . . .	443
9.5.3.1. Использование оптических кабельных вставок . . . . .	444
9.5.3.2. Восстановление ВОЛС по временной схеме . . . . .	445
9.5.3.3. Восстановление ВОЛС по постоянной схеме . . . . .	446
Литература к разделам 9.1–9.5 . . . . .	447
9.6. Дистанционный контроль и мониторинг ВОЛС . . . . .	447
9.6.1. Основные задачи контроля ВОЛС . . . . .	448
9.6.1.1. Факторы снижения надежности ВОЛС . . . . .	449

9.6.1.2. Факторы снижения безопасности ВОЛС . . . . .	450
9.6.2. Система мониторинга оптических кабелей . . . . .	451
9.6.2.1. Архитектура системы . . . . .	451
9.6.2.2. Конфигурирование и администрирование системы . . . . .	452
9.6.2.3. Функциональные возможности системы . . . . .	453
9.6.3. Методология мониторинга . . . . .	453
Литература к разделу 9.6 . . . . .	455
9.7. Стандартные конструктивы для монтажа оборудования ВОСП . . . . .	456
9.7.1. Шкафы кроссовые оптические . . . . .	456
9.7.1.1. Стандарты кроссовых оптических шкафов . . . . .	456
9.7.1.2. Сравнительный анализ стандартов оборудования . . . . .	457
9.7.1.3. Защита конструктивов от воздействия внешней среды . . . . .	457
9.7.1.4. Конструкции шкафов и стоек . . . . .	459
9.7.2. Оконечное кроссовое оптическое оборудование . . . . .	460
<b>10. Волоконно-оптическая техника в ЛС и СКС . . . . .</b>	<b>465</b>
10.1. Особенности использования ВОТ в ЛС и СКС . . . . .	465
10.2. Волоконно-оптические кабели для СКС . . . . .	466
10.2.1. Широкополосные многомодовые световоды . . . . .	466
10.2.2. Защитные покрытия волоконных световодов . . . . .	470
10.2.3. Волокно и кабели для систем пневматической прокладки . . . . .	471
10.2.4. ОК для применения в СКС и ЛС . . . . .	473
10.3. Оптические разъемы для ЛС и СКС . . . . .	474
10.3.1. Конструкции с наконечниками диаметром 1,25 мм . . . . .	476
10.3.2. Малогабаритные разъемы с наконечниками диаметром 2,5 мм . . . . .	476
10.3.3. Разъемы группового типа . . . . .	478
10.3.4. Конструкции разъемов без центрирующего наконечника . . . . .	479
10.4. Коммутационное оборудование оптических подсистем СКС . . . . .	479
10.4.1. Муфты и полки традиционных конструкций . . . . .	479
10.4.2. Оптические модули . . . . .	482
10.4.3. Информационные розетки . . . . .	483
10.4.3.1. Классические конструкции . . . . .	483
10.4.3.2. Многопортовые розетки абонентского уровня . . . . .	484
10.4.3.3. Розетки мультимедиа . . . . .	484
10.5. Интерактивное управление и идентификация портов в СКС . . . . .	485
10.5.1. Системы интерактивного управления . . . . .	485
10.5.2. Системы идентификации портов . . . . .	486
10.6. Приборы тестирования оптических трактов ЛС и СКС . . . . .	487
Литература к главе 10 . . . . .	489
<b>11. Сети широкополосного доступа . . . . .</b>	<b>490</b>
11.1. Типы сетей ШПД в РФ . . . . .	490
11.1.1. Локальные сети передачи данных . . . . .	491
11.1.1.1. Классы и адресация в IP-сетях . . . . .	492
11.1.2. Технология ГВКС . . . . .	494
11.1.2.1. Выбор технологии передачи данных для сетей ГВКС . . . . .	495
11.1.3. Технология ФТТВ . . . . .	497
11.1.4. Технология ФТТН . . . . .	498
11.2. Основные узлы сетевого сегмента КТВ . . . . .	499
11.2.1. Головная станция КТВ . . . . .	499
11.2.2. Волоконно-оптические магистрали и субмагистрали . . . . .	501
11.2.3. Оптические передатчики и усилители . . . . .	502
11.2.4. Оптические узлы и приемники . . . . .	503
11.2.5. Оптические разветвители . . . . .	505
11.3. Узлы сегмента передачи данных . . . . .	506
11.3.1. Узел передачи данных . . . . .	506

---

11.3.2. Коммутирующее оборудование . . . . .	507
11.3.3. Медиаконвертеры . . . . .	507
11.4. Цифровое телевидение . . . . .	508
11.4.1. Телевидение IPTV . . . . .	508
11.4.2. Телевидение DVB . . . . .	510
Литература к главе 11 . . . . .	512
<b>12. Пассивные оптические сети . . . . .</b>	<b>514</b>
12.1. Сети доступа, их технологии и архитектура . . . . .	514
12.1.1. Сеть доступа . . . . .	514
12.1.2. Волокно в сетях доступа . . . . .	514
12.1.3. Архитектура сетей PON . . . . .	515
12.1.3.1. Элементарные топологии . . . . .	515
12.1.3.2. Преимущества архитектуры PON . . . . .	517
12.1.4. Основные элементы сети PON . . . . .	517
12.1.5. Принцип действия PON . . . . .	517
12.1.6. Стандартизация сетей PON . . . . .	518
12.2. Основные технологии сетей PON . . . . .	519
12.2.1. Технологии APON/BPON . . . . .	519
12.2.2. Технология EPON . . . . .	520
12.2.3. Технология GPON . . . . .	520
12.2.4. Протокол APON MAC . . . . .	521
12.2.5. Надежность и резервирование в APON . . . . .	525
12.3. Ethernet на первой миле . . . . .	526
12.3.1. Эволюция Ethernet и технологии EPON . . . . .	526
12.3.2. Эволюция оптических интерфейсов Ethernet . . . . .	527
12.3.2.1. Оптические интерфейсы для EPON . . . . .	527
12.3.2.2. Основные характеристики EPON (IEEE 802.3ah) . . . . .	529
12.3.3. Принцип действия EPON . . . . .	529
12.3.4. Форматы кадров EPON . . . . .	530
12.3.5. Протокол MPCP . . . . .	532
12.3.5.1. Режим инициализации . . . . .	532
12.3.5.2. Нормальный режим работы . . . . .	533
12.3.6. Методы эмуляции соединения "т-т" и общей среды . . . . .	534
12.3.6.1. Эмуляция соединения типа "т-т" . . . . .	534
12.3.6.2. Эмуляция общей среды . . . . .	535
12.3.6.3. Комбинированная эмуляция P2PE и SME . . . . .	536
12.3.7. Эффективность EPON . . . . .	536
12.3.7.1. Эффективность использования полосы . . . . .	536
12.3.7.2. EPON и качество обслуживания (QoS) . . . . .	537
12.4. Проектирование оптимальных сетей PON . . . . .	538
12.4.1. Оптические параметры сетей PON . . . . .	538
12.4.1.1. Основные топологии сетей PON . . . . .	539
12.4.1.2. Требования к системам передачи по сетям PON . . . . .	540
12.4.1.3. Оптические потери в сети PON . . . . .	541
12.4.2. Разветвители и их характеристики . . . . .	543
12.4.2.1. Схема и характеристики разветвителя . . . . .	543
12.4.2.2. Классификация разветвителей . . . . .	544
12.4.2.3. Учет других параметров разветвителей . . . . .	546
12.4.3. Задача проектирования оптимальных сетей PON . . . . .	547
12.4.3.1. Точки роста . . . . .	547
12.4.3.2. Сбалансированная сеть PON . . . . .	548
12.4.3.3. Алгоритм построения сбалансированной сети . . . . .	549
12.4.3.4. Дисбаланс растущей сети . . . . .	549
Литература к главе 12 . . . . .	550

<b>13. Волоконно-оптические датчики</b> . . . . .	552
13.1. Классификация датчиков . . . . .	552
13.2. Датчики по принципу кодирования информации . . . . .	553
13.2.1. Амплитудные датчики . . . . .	553
13.2.1.1. Разрывные ВОД . . . . .	553
13.2.1.2. Неразрывные ВОД . . . . .	554
13.2.2. Туннельные датчики . . . . .	556
13.2.3. Поляризационные датчики . . . . .	559
13.2.3.1. Эффект Погккельса . . . . .	559
13.2.3.2. Эффект Фарадея . . . . .	560
Датчик давления . . . . .	561
Датчик ускорения . . . . .	562
13.2.4. Фазовые датчики . . . . .	562
13.2.4.1. Интерферометр Майкельсона . . . . .	563
13.2.4.2. Интерферометр Маха-Цендера . . . . .	563
13.2.4.3. Интерферометр Фабри-Перо . . . . .	564
13.2.4.4. Интерферометр Саньяка . . . . .	564
13.2.5. Датчики со спектральным кодированием . . . . .	565
13.2.5.1. Типы ВОД на ИФП . . . . .	566
13.2.5.2. ВОД на основе ВРБ . . . . .	566
13.2.5.3. ВОД на основе двух скрученных волокон . . . . .	567
13.2.5.4. ВОД на эффекте Бриллюэна . . . . .	567
13.2.5.5. ВОД на эффекте Рамана . . . . .	568
Датчики на ВРБ и ИФП . . . . .	568
ВОД на основе скрученных волокон . . . . .	569
13.3. Системы мониторинга промышленных объектов . . . . .	569
13.3.1. Применение ВОД для измерения физических величин . . . . .	569
13.3.1.1. Измерение температуры . . . . .	569
13.3.1.2. Измерение давления . . . . .	571
13.3.1.3. Измерение вибрации . . . . .	573
13.3.1.4. Измерение скорости потока . . . . .	575
13.3.1.5. Измерение уровня жидкости . . . . .	576
13.3.1.6. Измерение положения . . . . .	578
13.3.1.7. Измерение тока и напряжения . . . . .	579
Волоконный трансформатор напряжения . . . . .	580
Волоконный трансформатор/датчик тока . . . . .	580
13.3.1.8. Химический анализ . . . . .	582
13.3.2. Системы мониторинга на базе ВОД . . . . .	584
13.3.2.1. Общие сведения . . . . .	584
13.3.2.2. Волоконные информационные измерительные системы . . . . .	584
13.3.3. Примеры систем мониторинга . . . . .	585
13.3.3.1. Мониторинг нефтегазопроводов . . . . .	586
13.3.3.2. Мониторинг транспортировки электроэнергии . . . . .	589
13.3.3.3. Мониторинг в строительстве . . . . .	590
13.3.3.4. Мониторинг на транспорте . . . . .	593
13.4. Тенденции развития . . . . .	595
Литература к главе 13 . . . . .	596
Список используемых сокращений . . . . .	597
Авторский коллектив . . . . .	607