

В.Н. Цуканов, М.Я. Яковлев

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Практическое руководство



«Инфра-Инженерия»

В.Н. ЦУКАНОВ, М.Я. ЯКОВЛЕВ

ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Практическое руководство

2-е издание

**Инфра-Инженерия
Москва
2015**



УДК 621.39
ББК 32.88
Ц85

Цуканов В.Н., Яковлев М.Я.
Ц 85 Волоконно-оптическая техника.
Практическое руководство. – 2-е изд. –
М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 304 с.

ISBN 978-5-9729-0078-7

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики, а также методы их измерения, оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов.

Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов.

Книга содержит практические рекомендации по построению традиционных и оригинальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических концентраторов, коммутаторов, медиаконверторов, автономных источников питания узлов подводных ВОСП, волоконно-оптических систем распределения СВЧ сигналов, волоконно-оптических фазовращателей, активных волоконно-оптических линий задержки, оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона, оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

© Цуканов В.Н., Яковлев М.Я., 2015
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2015

ISBN 978-5-9729-0078-7

Содержание

Введение	3
Глава 1	
Волоконно-оптическая компонентная база	
1.1 Общие сведения.....	5
1.2 Оптические волокна.....	5
1.2.1 Общие сведения.....	5
1.2.2 Геометрические характеристики.....	6
1.2.3 Погонное затухание.....	8
1.2.4 Длина волны отсечки.....	8
1.2.5 Хроматическая дисперсия и длина волны нулевой дисперсии.....	10
1.2.6 Числовая апертура.....	11
1.2.7 Полоса пропускания.....	11
1.2.8 Поляризационная модовая дисперсия.....	12
1.2.9 Типы оптических волокон.....	12
1.2.10 Перспективы производства оптических волокон в России.....	13
1.2.10.1 История освоения производства оптических волокон и кабелей в России.....	13
1.2.10.2 Перспективы освоения производства оптических волокон и кабелей в России.....	17
1.3 Оптические кабели.....	18
1.3.1 Общие сведения.....	18
1.3.2 Оптические модули.....	19
1.3.2.1 Модули со свободной укладкой волокон.....	19
1.3.2.2 Модули с плотной упаковкой волокон.....	19
1.3.2.3 Ленточные модули.....	20
1.3.3 Силовой сердечник.....	20
1.3.4 Защитные покровы и силовые элементы защитных покровов.....	20
1.3.5 Наружная оболочка.....	21
1.3.6 Основные параметры и характеристики.....	22
1.3.7 Основные типы оптических кабелей.....	22
1.3.8 Монтажные и бортовые оптические кабели типа ОК-МС06, ОК-БС06, ОК-БС06Е.....	22
1.3.9 Бортовые оптические кабели типа ОК-БС08, ОК-БС09.....	24
1.3.10 Бортовой оптический кабель типа ОК-БС10.....	24
1.3.11 Термостойкий бортовой оптический кабель типа ОК-БС11.....	25
1.3.12 Термостойкий бортовой оптический кабель типа ОК-БС12.....	26
1.3.13 Монтажный оптический кабель типа ОК-МС09.....	26
1.3.14 Монтажный оптический кабель типа ОК-МС11.....	27
1.3.15 Монтажные оптические кабели типа ОК-МС14 и ОК-МС16.....	28
1.3.16 Термостойкий монтажный оптический кабель типа ОК-МС17.....	28
1.3.17 Кабель оптический специальный ОКЦ-О-3Е1.....	29
1.3.18 Кабели оптические полевые ОК-ПН-04(06)-0,7-2 и ОК-ПН-03(05)-0,7-2.....	30
1.4 Компоненты волоконно-оптических систем передачи.....	31
1.4.1 Общие сведения.....	31
1.4.2 Пассивные оптические компоненты.....	32
1.4.2.1 Оптические соединители.....	32
1.4.2.1.1 Общие сведения.....	32
1.4.2.1.2 Основные параметры разъемных оптических соединителей.....	36
1.4.2.1.2.1 Конструктивно-технологические параметры.....	36
1.4.2.1.2.2 Параметры передачи.....	36

1.4.2.1.2.2.1 Вносимые оптические потери.....	37
1.4.2.1.2.2.2 Потери на отражение.....	42
1.4.2.1.2.2.3 Динамическая нестабильность оптических вносимых потерь.....	44
1.4.2.1.2.2.4 Переходное затухание на ближнем и дальнем концах (для многополюсных оптических соединителей).....	45
1.4.2.1.2.2.5 Нестабильность оптических вносимых потерь оптического вращающего перехода при взаимном вращении соединяемых оптических наконечников.....	45
1.4.2.1.3 Отечественные разъемные оптические соединители для жестких условий эксплуатации.....	47
1.4.2.1.3.1 Оптические соединители по ТУ6665-001-41085936-96.....	47
1.4.2.1.3.2 Оптические соединители по ТУ6665-001-11651143-2001.....	51
1.4.2.1.3.3 Оптические соединители по ТУ6665-011-41085936-2008.....	58
1.4.2.1.3.4 Оптические соединители по ТУ6665-016-41085936-2009.....	61
1.4.2.2 Оптические разветвители и объединители.....	65
1.4.2.2.1 Общие сведения.....	65
1.4.2.2.2 Области применения оптических разветвителей и объединителей.....	66
1.4.2.2.2.1 Применение оптических разветвителей для «горячего» резервирования в аналоговых и цифровых волоконно-оптических системах передачи....	67
1.4.2.2.2.2 Применение оптических разветвителей и объединителей в цифровых волоконно-оптических системах передачи для уплотнения передаваемой информации.....	67
1.4.2.2.2.2.1 Применение оптических мультиплексоров и демультимплексоров в волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением.....	67
1.4.2.2.2.2.2 Применение оптических мультиплексоров и демультимплексоров в волоконно-оптических системах передачи с временным уплотнением.....	68
1.4.2.2.2.2.3 Применение оптических разветвителей в пассивных оптических сетях доступа.....	74
1.4.2.2.2.2.4 Применение оптических разветвителей и объединителей в оптических концентраторах.....	74
1.4.2.2.2.3 Применение оптических разветвителей и объединителей в аналоговых системах передачи.....	76
1.4.2.2.3 Основные параметры оптических разветвителей и объединителей.....	79
1.4.2.2.3.1 Конструктивно-технологические параметры.....	79
1.4.2.2.3.2 Параметры передачи.....	79
1.4.2.2.3.2.1 Рабочий диапазон длин волн.....	79
1.4.2.2.3.2.2 Оптические вносимые потери.....	80
1.4.2.2.3.2.3 Оптические избыточные потери.....	80
1.4.2.2.3.2.4 Коэффициент передачи между оптическими полюсами на дальнем конце.....	80
1.4.2.2.3.2.5 Переходное затухание на ближнем и дальнем концах.....	80
1.4.2.2.3.2.6 Неравномерность коэффициента передачи между оптическими полюсами.....	80
1.4.2.2.3.2.7 Интервал частот (или длин волн) оптических сигналов на входных оптических полюсах оптического спектрального мультиплексора и демультимплексора.....	80
1.4.2.2.3.2.8 Скорость передачи сигнала на выходном полюсе оптического временного мультиплексора и на входном полюсе оптического временного демультимплексора.....	81

1.4.2.2.4	Оптические разветвители и объединители для жестких условий эксплуатации.....	82
1.4.2.2.4.1	Одномодовые разветвители и объединители, изготавливаемые по ТУ6665-018-41085936-2006.....	84
1.4.2.2.4.2	Многомодовые оптические спектральные мультиплексоры и демультимплексоры, изготавливаемые по ТУ6665-018-41085936-2006.....	86
1.4.2.3	Волоконно-оптические линии задержки.....	88
1.4.2.3.1	Общие сведения.....	88
1.4.2.3.2	Волоконно-оптическая линия задержки МЛЗ-5-FC/APC.....	88
1.4.2.3.3	Элемент задержки ЭЗ-2,0.....	89
1.4.2.4	Оптические переключатели и коммутаторы.....	90
1.4.2.4.1	Общие сведения.....	90
1.4.2.4.2	Электромеханические оптические переключатели.....	90
1.4.2.4.3	Электрооптические переключатели.....	91
1.4.2.4.4	Другие типы оптических переключателей.....	92
1.4.2.5	Условные обозначения типов пассивных компонентов.....	93
1.4.2.5.1	Условные обозначения неразъемных оптических соединителей.....	93
1.4.2.5.2	Условные обозначения разъемных оптических соединителей.....	94
1.4.2.5.3	Условные обозначения оптических разветвителей, объединителей, мультиплексоров, демультимплексоров.....	94
1.4.2.5.4	Условные обозначения оптических переключателей или коммутаторов.....	95
1.4.2.5.5	Условные обозначения волоконно-оптических линий задержки.....	95
1.4.2.6	Вопросы надежности пассивных оптических компонентов для волоконно-оптических систем передачи информации.....	95
1.4.2.6.1	Оценка долговечности пассивных волоконно-оптических компонентов.....	95
1.4.2.6.2	Контроль безотказности пассивных компонентов волоконно-оптических систем передачи.....	97
1.4.2.6.2.1	Особенности волоконно-оптических компонентов по сравнению с электронными компонентами.....	97
1.4.2.6.2.2	Выбор нулевой гипотезы для наработок до отказа волоконно-оптических компонентов.....	99
1.4.2.6.2.3	Особенности планирования испытаний на соответствие требований безотказности пассивных компонентов ВОСП.....	103
1.4.2.6.2.4	Оптимальное планирование нормальных испытаний.....	104
1.4.2.6.2.5	Расчет объема выборки и продолжительности испытаний.....	104
1.4.2.6.2.6	Определение параметров распределения Вейбулла.....	106
1.4.2.6.2.7	Определение параметров нормального распределения.....	107
1.4.2.6.2.8	Определение параметров логарифмически нормального распределения.....	108
1.4.2.6.2.9	Особенности проверки адекватности нулевой гипотезы.....	108
1.4.2.6.2.10	Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по закону Вейбулла.....	109
1.4.2.6.2.11	Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по нормальному закону.....	109
1.4.2.6.2.12	Расчет вероятности безотказной работы компонентов за наработку в течение T_v , если наработки до отказа распределены по логарифмически нормальному закону.....	111
1.4.2.6.2.13	Порядок вычисления $P(T_v)$ методом множительной оценки.....	111
1.4.3	Активные оптические компоненты.....	112
1.4.3.1	Передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	113
1.4.3.1.1	Общие сведения.....	113

1.4.3.1.2	Дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	112
1.4.3.1.2.1	Аналоговые дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	112
1.4.3.1.2.2	Цифровые дискретные передающие и приемные оптоэлектронные модули.....	115
1.4.3.1.2.2.1	Цифровые дискретные передающие оптоэлектронные модули ПОМ-26.....	116
1.4.3.1.2.2.2	Цифровые дискретные приемные оптоэлектронные модули ПРОМ-14.....	120
1.4.3.1.3	Оптические трансиверы.....	123
1.4.3.1.3.1	Оптические трансиверы типа 1x9.....	123
1.4.3.1.3.2	Оптические трансиверы SFF типа 2x5 и GBIC.....	126
1.4.3.1.3.3	Оптические трансиверы SFP.....	126
1.4.3.1.3.4	Оптические трансиверы XFP.....	130
1.4.3.2	Активные волоконно-оптические линии задержки.....	131
1.4.3.2.1	Общие сведения.....	131
1.4.3.2.2	Аналоговая волоконно-оптическая линия задержки типа ФКЯИ.203731.010.....	131
1.4.3.2.3	Аналоговая волоконно-оптическая линия задержки ВОЛЗА-120.....	132
1.4.3.3	Оптические ретрансляторы.....	133
1.4.3.3.1	Общие сведения.....	133
1.4.3.3.2	Ретрансляторы уровня 1R.....	133
1.4.3.3.2.1	Эрбиевые волоконные усилители.....	134
1.4.3.3.2.1.1	Эрбиевые оптические усилители типа DTL-НА5900.....	135
1.4.3.3.2.1.2	Подводные эрбиевые оптические усилители НТО «ИРЭ-Полус».....	136
1.4.3.3.2.2	Рамановские волоконные усилители.....	136
1.4.3.3.2.3	Ретрансляторы уровня 2R, 3R и оптические волновые конвертеры.....	137
1.4.3.4	Оптические модуляторы.....	138
1.4.3.4.1	Общие сведения.....	138
1.4.3.4.2	Электрооптические модуляторы.....	139
1.4.3.4.3	Магнитооптические модуляторы.....	140
1.4.3.4.4	Акустооптические модуляторы.....	140
1.4.3.4.5	Интегрально-оптические модуляторы.....	140

Глава 2

Опыт проектирования волоконно-оптических систем передачи

2.1	Терминология, классификация волоконно-оптических систем передачи.....	141
2.2	Вопросы проектирования аналоговых волоконно-оптических систем передачи.....	142
2.2.1	Температурная стабилизация рабочей точки лазерного диода.....	143
2.2.2	Использование оптических изоляторов в аналоговых ВОСП.....	145
2.2.3	Шумовые параметры аналоговых ВОСП.....	147
2.2.4	Влияние дисперсии времени распространения оптического излучения в оптическом волокне.....	149
2.3	Вопросы проектирования цифровых волоконно-оптических систем передачи.....	152
2.3.1	Введение.....	152
2.3.2	Специфика проектирования цифровых объектовых ВОСП.....	152
2.3.2.1	Анализ технологий и интерфейсов цифровых объектовых ВОСП.....	152
2.3.2.1.1	CAN.....	153
2.3.2.1.2	AS-Interface.....	153
2.3.2.1.3	FOUNDATION fieldbus и PROFIBUS-PA.....	153
2.3.2.1.4	MIL-STD-1553B.....	154
2.3.2.1.5	IEEE 1394 (Firewire).....	155
2.3.2.1.6	Fiber Distributed Data Interface (FDDI).....	155
2.3.2.1.7	Fibre Channel (FC).....	156

2.3.2.1.8 Asynchronous Transfer Mode (ATM).....	156
2.3.2.1.9 Промышленный Ethernet.....	156
2.3.2.2 Заключение.....	160
2.3.2.3 Простые концентраторы сети Fast Ethernet.....	161
2.3.2.3.1 Построение концентратора на базе микросхемы LXT983.....	161
2.3.2.3.2 Нетрадиционные подходы к построению схемы концентратора.....	163
2.3.2.4 Коммутаторы сети Gigabit Ethernet.....	166
2.3.2.5 Медиаконвертеры.....	169
2.3.2.5.1 Построение медиаконвертеров с применением микросхем трансиверов.....	170
2.3.2.5.2 Построение медиаконвертеров с применением микросхем коммутаторов...	170
2.3.2.5.3 Построение медиаконвертеров с применением оптических трансиверов.....	171
2.3.3 Специфика проектирования магистральных сегментов ВОСП.....	174
2.3.3.1 Введение.....	174
2.3.3.2 Планирование магистральной ВОСП.....	176
2.3.3.3 Обзор телекоммуникационного оборудования.....	178
2.3.3.3.1 Мультиплексоры SDH группы компаний «Натекс».....	178
2.3.3.3.2 Мультиплексоры SDH ООО «Кьютэк».....	180
2.3.3.3.3 Мультиплексоры SDH ОАО «Супертел».....	180
2.3.3.3.4 Мультиплексоры SDH Ericsson.....	180
2.3.3.3.5 Оборудование Cisco System.....	180
2.3.4 Специфика проектирования подводных ВОСП.....	185
2.3.4.1 Расчет ретрансляционных участков.....	185
2.3.4.1.1 Расчет длины ретрансляционных участков ограниченных затуханием.....	186
2.3.4.1.2 Расчет длины ретрансляционных участков ограниченных дисперсией.....	188
2.3.4.2 Расчет максимального количества последовательно включенных оптических усилителей.....	189
2.3.4.3 Расчет электропитания.....	190
2.3.4.3.1 Обзор автономных источников электропитания.....	191
2.3.4.3.2 Расчет электропитания по медным жилам кабеля.....	192
2.3.4.4 Анализ вариантов построения DC/DC преобразователей.....	195
2.3.4.4.1 Построение преобразователя с применением пьезотрансформаторов.....	195
2.3.4.4.2 Построение DC/DC преобразователя с применением емкостных накопителей энергии.....	196
2.3.4.4.3 Построение DC/DC преобразователя на полупроводниковых инверторах.....	201
2.3.4.4.4 Заключение.....	202
2.3.5 Вопросы тестирования узлов цифровых ВОСП.....	202
2.3.5.1 Оборудование, проверяемые параметры.....	203
2.3.5.2 Проверка пропускной способности канала передачи фрагмента сети Fast Ethernet.....	207
2.3.5.3 Проверка пропускной способности канала передачи фрагмента сети Gigabit Ethernet.....	212
2.3.5.4 Проверка параметра ошибок по битам канала передачи фрагментов сети Fast Ethernet и Gigabit Ethernet.....	215
2.3.6 Нетрадиционные подходы к построению цифровой ВОСП.....	216
2.3.6.1 Традиционный подход к построению цифровой ВОСП.....	216
2.3.6.2 Символьный метод передачи цифровой информации.....	216
2.3.6.3 Метод комбинированного спектрального и временного уплотнения.....	217
2.3.6.4 Кластерный метод передачи цифровых данных.....	223
2.4 Надежность ВОСП.....	230
Глава 3	
Опыт проектирования измерительных преобразователей волоконно-оптических датчиков	
3.1 Терминология и классификация.....	233

3.2 РВОД использующие эффект рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	234
3.2.1 Эффект рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	234
3.2.2 Эффект вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	235
3.2.3 Влияние деформаций и температуры на спектр рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	236
3.2.4 Метрологические характеристики при измерении деформаций и температуры по спектру рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	236
3.2.5 Методы построения РВОД на основе эффекта рассеяния Манделъштама-Бриллюэна.....	238
3.2.5.1 Метод измерения усиления/ослабления.....	238
3.2.5.2 Метод оптической рефлектометрии.....	239
3.3 РВОД использующие эффект рамановского рассеяния.....	243
3.3.1 Теория эффекта рамановского рассеяния.....	243
3.3.2 Методы построения РВОД на основе эффекта рамановского рассеяния.....	245
3.4 Квази РВОД для измерения распределения температуры.....	247
3.5 Квази РВОД для измерения превышения заданного уровня деформации.....	251
Глава 4	
Опыт проектирования изделий радиофотоники	
4.1 Общие сведения.....	255
4.2 Компонентная база радиофотоники.....	256
4.3 Опыт проектирования устройств СВЧ с использованием радиофотоники.....	256
4.3.1 Опыт проектирования узлов АФАР с использованием достижений радиофотоники.....	257
4.3.1.1 Опыт проектирования волоконно-оптических линий передачи и распределения СВЧ сигналов.....	257
4.3.1.2 Опыт проектирования волоконно-оптических фазовращателей.....	262
4.3.2 Опыт проектирования активных волоконно-оптических линий задержки.....	267
4.3.3 Опыт проектирования оптоэлектронных генераторов СВЧ диапазона.....	272
4.3.4 Опыт проектирования оптоэлектронных АЦП и ЦАП.....	274
Список сокращений.....	279
Список литературы.....	281