

СПРАВОЧНИК

ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И КАБЕЛИ



МОСКВА „РАДИО И СВЯЗЬ“
1993

ББК 32.845
В 67
УДК 621.391.63:681.7.068

Федеральная целевая программа книгоиздания России

**Авторы: И. И. Гроднев, А. Г. Мурадян, Р. М. Шарафутдинов,
Е. Б. Алексеев, М. И. Александровский, Р. Г. Сванидзе,
С. Н. Ксенофонтов, В. М. Хабибулин**

Рецензент В. С. Ромбро

Редакция литературы по радиотехнике и электросвязи

В 67 Волоконно-оптические системы передачи и кабели:
Справочник / И. И. Гроднев, А. Г. Мурадян, Р. М. Шара-
футдинов и др. — М.: Радио и связь, 1993. — 264 с.: ил.

ISBN 5-256-00932-X.

Справочник содержит сведения о современных системах передачи, оптических кабелях, оптоэлектронных компонентах, оконечной и промежуточной аппаратуре магистральных, зонавых и городских сетей связи. Приводятся конструктивные, оптические и физико-механические характеристики оптических кабелей и оценивается их надежность. Описываются приборы и методы измерений. Излагаются основные данные, нормы и рекомендации по развитию оптической связи в стране.

Для проектировщиков, строителей и работников эксплуатации волоконно-оптических линий и трактов связи, а также для широкого круга специалистов, занимающихся оптоэлектроникой, и будет полезен студентам вузов и учащимся техникумов.

2303040000-065
В 046(01)-93 КБ-52-124-92

ББК 32.845

Справочное издание

**Гроднев Игорь Измайлович, Мурадян Ашот Гарегинович,
Шарафутдинов Рафаил Муссолимович и др.**

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И КАБЕЛИ

ИБ № 2423

Сдано в набор 29.03.93	Подписано в печать 2 06.93	ЛР № 010164 от 04.01.92 г	
Формат 60×90 ^{1/16}	Бумага тип. № 2	Гарнитура литер	
Печать высокая	Усл. печ. л. 16,50	Усл. кр.-отт. 16,88	Уч.-изд. л. 22,60
Тираж 3000 экз.	Изд. № 23344	Зак. 1833	С-065

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ
140010, Люберцы, 10, Октябрьский пр., 403

ISBN 5-256-00932-X

**© Гроднев И. И., Мурадян А. Г.,
Шарафутдинов Р. М. и др., 1993**

Предисловие

Одним из важнейших достижений последнего времени в области связи является появление **оптических кабелей (ОК)** и **волоконно-оптических систем передачи (ВОСП)**, которые по своим характеристикам превосходят все традиционные кабели и системы связи. Оптические системы и кабели используют не только для организации телефонной городской и междугородной связи, но и для кабельного телевидения, видеотелефонии, радиовещания, вычислительной техники, технологической связи и т. д. Кроме того, они получили применение в машиностроении, медицине, для связи с подвижными объектами, в энергосистемах.

Темпы роста производства волоконной оптики и оптических кабелей за рубежом опережают темпы производства электрических кабелей и составляют 40% в год. Ряд стран уже сейчас отказался от традиционных металлических кабелей и строительство новых линий связи переводит на оптические кабели. В мире идет интенсивный процесс совершенствования как оптических кабелей, так и оптоэлектронной аппаратуры. Получают широкое развитие оптические кабели с одномодовыми волокнами, осваиваются новые диапазоны инфракрасного диапазона (2...6 мкм) и новые материалы с малыми потерями (фторкомпозитии и др.).

В настоящее время ведется строительство волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) магистрального, зонового и городского назначения. Намечается строительство транссибирской оптической линии (ТСЛ), связывающей Японию, Россию и Европу, которая завершит создание глобального волоконно-оптического кольца цифровой связи, охватывающего страны Европы, Америки, Азии и Австралии.

Для успешного сооружения и эксплуатации оптических линий нужны высококвалифицированные кадры и соответствующая литература для их подготовки. Крайне необходимы также для новой развивающейся отрасли техники и справочники. В настоящем справочнике приводятся данные о системах передачи, современных оптических кабелях, оптоэлектронных компонентах, оконечной и промежуточной аппаратуре, а также об измерительной технике. Существенное внимание уделяется вопросам проектирования, строительства ВОЛС и оценке их надежности.

Главы 1—3 и 9 написаны И. И. Гродневым; 4 и 8 — Р. М. Шарфутдиновым; 5 — Р. Г. Сванядзе; 6 — А. Г. Мурадяном; 7 — совместно А. Г. Мурадяном, Е. Б. Алексеевым, М. И. Александровским; 10 и приложения — В. М. Хабибуллиным; 11 — С. Н. Ксенофоновым.

Авторы выражают благодарность рецензенту В. С. Ромбро за ценные советы и рекомендация, способствующие улучшению содержания справочника.

Перечень принятых сокращений

АСП	— аналоговые системы передачи
В	— волновод
ВВГ, ТВГ и ЧВГ	— соответственно вторичная, третичная и четверичная аппара- тура временного группообразования
ВЛ	— воздушная линия
ВОЛС	— волоконно-оптическая линия связи
ВОСП	— волоконно-оптическая система передачи
ВРК	— временное разделение каналов
ВС	— волоконный световод
ВТЧ	— выделитель тактовой частоты
ГТС	— городская телефонная связь
ДП	— дистанционное питание
ЭС	— зонавая связь
ИКМ	— импульсно-кодовая модуляция
ИКО	— измеритель коэффициента ошибок
КИА	— контрольно-измерительная аппаратура
КЛТ	— кассета линейного тракта
КПК	— комплект преобразователей кода
КТП	— карта трудового процесса
КЭМ	— квантово-электронный модуль
Л	— лазер
ЛД	— лазерный диод
ЛИОК	— лаборатория измерения и монтажа оптического кабеля
ЛР	— линейный регенератор
ЛФД	— лавинный фотодиод
ММОК	— муфта междугородного оптического кабеля
МОВ	— многомодовое оптическое волокно
МС	— магистральная связь
НРП	— необслуживаемый регенерационный пункт
НС	— направляющая система (среда)
ОВ	— оптическое волокно
ОВГ	— оборудование вторичного группообразования
ОГ	— оптический генератор
ОЗКГ	— оптический зондовый кабель
ОК	— оптический кабель
ОК-50 и	— оптические городские кабели
ОКК	— оптический кабель линейный
ОКЛ	— оптический кабель станционный
ОКС	— оборудование линейного тракта
ОЛТ	— оптический модуль
ОМ	— оптический магистральный кабель
ОМЗКГ	— одномодовое оптическое волокно
ООВ	— оконечный пункт
ОП	— обслуживаемый регенерационный пункт
ОРП	— оптоэлектрический преобразователь
ОЭП	— позиционно-импульсная модуляция
ПИМ	— преобразователь кода
ПК	

ПЛ	— полупроводниковый лазер
ПМК	— передвижная механизированная колонна
ПОМ	— передающий оптоэлектронный модуль
ППП	— профиль показателя преломления
ПРОМ	— приемный оптоэлектронный модуль
ПСС	— постанционная служебная связь
ПСП	— псевдослучайная последовательность
Р	— регенератор
РРЛ	— радиорелейная линия
СД	— светодиод
СЛ	— спутниковая линия
СМОК	— соединительная муфта оптического кабеля для ГТС
СМУ	— строительно-монтажное управление
СУ	— согласующее устройство
ТК	— технологическая карта
ТМ	— телемеханика
ТН	— типовые нормы
ТУ	— телеуправление
ТЧ	— тональная частота
УВК	— устройство ввода кабеля
УЗК	— устройство заготовки каналов
УСС	— участковая служебная связь
УУ	— управляющее устройство
ФД	— фотодиод
ЦВОСП	— цифровая волоконно-оптическая система передачи
ЦСП	— цифровые системы передачи
ЧРК	— частотное разделение каналов
ШСС	— шнур соединительный световодный
ЭО	— электронный осциллограф
ЭОП	— электрооптический преобразователь

Глава 1

Основные сведения о волоконно-оптической связи

1.1. Развитие волоконно-оптической связи

Оптоэлектронная связь сегодня является одним из главных направлений научно-технического прогресса. Достоинства оптических кабелей и систем передачи, и в первую очередь экономия меди, вызвали повышенный интерес к ним и привели к интенсивному развитию этой отрасли техники. В настоящее время волоконная оптика получила широкое развитие в различных областях науки и техники, и производства (связь, радиоэлектроника, энергетика, термоядерный синтез, медицина, машиностроение, летающие аппараты, вычислительные комплексы и т. д.).

Особое внимание у нас и за рубежом уделяется созданию и внедрению одномодовых систем передачи по оптическим кабелям, которые рассматриваются как наиболее перспективное направление развития техники связи. Достоинством одномодовых систем является возможность передачи большого потока информации на требуемые расстояния при больших длинах регенерационных участков. Уже сейчас имеются волоконно-оптические линии на большое число каналов с длиной регенерационного участка 100...150 км. Последнее время в США ежегодно изготавливается по 1,6 млн. км оптических волокон, причем 80% из них — в одномодовом варианте. Проложены подводные одномодовые магистрали через Атлантический и Тихий океаны на 12 000 каналов с регенерационными участками длиной 50 км. Для сравнения можно указать, что для традиционных коаксиальных кабелей требуется установка регенераторов через каждые 6, 3 и даже 1,5 км.

Основные достоинства ВОЛС и некоторые области их использования

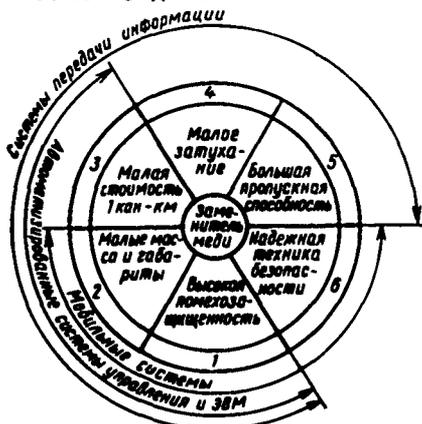


Рис. 1.1. Свойства и области использования оптоэлектронной техники

перечислены на рис. 1.1. Для систем связи существенными являются показатели 1—5, для автоматизированных систем управления и ЭВМ — показатели 1—3, мобильные подвижные системы требуют в первую очередь обеспечения показателей 1, 2, 6.

Область возможных применений ВОЛС весьма широка — от линий городской, сельской связи и бортовых комплексов (самолеты, ракеты, корабли) до систем связи на большие расстояния с высокой информационной емкостью. На основе оптической волоконной связи могут быть созданы принципиально новые системы передачи информации.

На базе ВОЛС развивается единая интегральная сеть многоцелевого назначения — для телефонной и теле-

графной связи, телевидения, передачи данных и т. д. Весьма перспективно применение оптических систем в кабельном телевидении, которое обеспечивает высокое качество изображения и существенно расширяет возможности информационного обслуживания абонентов.

В ближайшем будущем следует ожидать появления фторированных, халькогенидных и других типов оптических волокон, которые при использовании ближнего инфракрасного диапазона волн (2...4 мкм) позволяют уменьшить потери до 0,1...0,2 дБ/км и существенно увеличить длины регенерационных участков. Спектральное уплотнение позволит увеличить пропускную способность оптических трактов передачи. Дальнейшее развитие получат оптоэлектронные устройства передающего и приемного назначения, широко будет применяться интегральная оптика. Следует ожидать, что усиление и преобразование сигналов будут происходить на оптических частотах. В перспективе получат развитие акустооптические преобразователи, непосредственно преобразующие сигналы в оптические.

1.2. Структурная схема волоконно-оптической связи

В оптических системах передачи, как и в обычных системах передачи по электрическим кабелям, применяются частотный и временной методы разделения каналов. Но наибольшее распространение получила цифровая система с временным разделением каналов и импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), использующая модуляцию интенсивности излучения источника. Дуплексная связь осуществляется по двум волоконным световодам, каждый из которых предназначен для передачи информации в одном направлении. В оптических системах связи преимущественно используются цифровые системы передачи с ИКМ на 30, 120, 480 и 1920 каналов.

Структурная схема волоконно-оптической связи с ИКМ приведена на рис. 1.2. Основными элементами схемы являются оптический кабель (ОК), а также оптический передатчик (ОПер) в начале и оптический приемник (ОПр) в конце системы. Передатчик выполняет роль преобразователя электрического сигнала в оптический (ЭОП), а приемник обеспечивает обратное преобразование оптического сигнала в электрический (ОЭП). В качестве ЭОП наибольшее применение получили полупроводниковый лазер (ПЛ) и световозлучающий диод (СД), а в качестве ОЭП — фотодиод (ФД).

Для преобразования кода и согласования элементов схемы используются кодирующие и согласовывающие оптические устройства (СУ). Преобразователь кода (ПК) формирует требуемую последовательность импульсов и осуществляет согласование уровней по мощности между электрическими (ИКМ) и оптическими (СД и ФД) элементами схемы. Передающие и приемные согласовывающие устройства формируют и согласовывают диаграммы направленности и апертуру между приемно-передающими устройствами и кабелем.

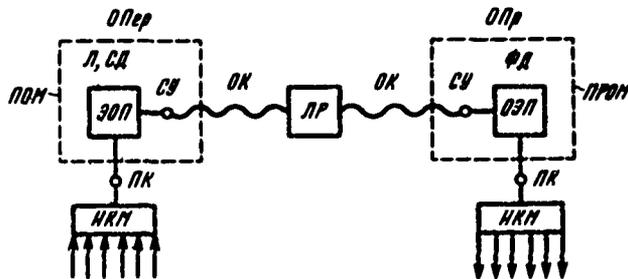


Рис. 1.2. Структурная схема волоконно-оптической связи

Передаваемый ИКМ-сигнал через ПК поступает в ЭОП, где он модулирует оптическую несущую, создаваемую Л или СД, и через передающее СУ поступает в оптический кабель. На приеме оптический сигнал через приемное СУ поступает в фотодиод, где преобразуется в электрический сигнал, усиливается и через ПК поступает в приемник аппаратуры ИКМ.

Таким образом, на передающей стороне от аппаратуры ИКМ до ЭОП, а также на приемной стороне от ЭОП до аппаратуры ИКМ проходит электрический сигнал, а от ЭОП до ЭЭП по оптическому кабелю — оптический сигнал.

В реальных условиях оказалось весьма целесообразным все элементы оптического передатчика и приемника изготавливать в виде компактного устройства — оптоэлектронного модуля: ПОМ — на передаче и ПРОМ на приеме. Конструктивно этот модуль размером в спичечную коробку позволяет подключить с одной стороны аппаратуру ИКМ, а с другой — оптический кабель.

Через определенные расстояния (30...100 км), обусловленные величиной затухания кабеля вдоль оптической линии, располагаются линейные регенераторы (ЛР), где сигнал восстанавливается и усиливается до требуемой величины.

Приведенная структурная схема связи послужила основой построения волоконно-оптических систем передачи для различных звеньев сети связи. В табл. 1.1 приведены основные характеристики ВОСП для городской, сельской, зоновой и магистральной связи.

Таблица 1.1

Характеристика	ВОСП для связи			
	городской	сельской	зоновой	магистральной
Тип световода	Ступенчатый	Ступенчатый	Градиентный	Одномодовый
Размеры ОВ, мкм	50/125 и 10/125	50/125	50/125	8...10/125
Длина волны, мкм	0,85 и 1,3	0,85	1,3	1,55
Коэффициент затухания, дБ/км	1...3	3...5	1	0,3
Полоса пропускания, МГц·км	250...500	200...300	500...800	5000
Числовая апертура	0,2	0,2	0,15	0,12
Растягивающее усилие, Н	1200	1200	3000	3000
Система передачи	ИКМ-120	ИКМ-30	ИКМ-480	ИКМ-1920
Скорость передачи, Мбит/с	8,5	2	34	140
Длина регенерационного участка, км	12...30	10...15	30	70...100
Число волокон в кабеле	4,8	4	4,8	4, 8 и 16
Диаметр кабеля, мм	14	12	17	18
Масса кабеля, кг/км	140	100	370	400
Температура, °С	-40...+50	-40...+50	-40...+50	-40...+50
Строительная длина, км	1...2	1...2	2	2
Электропитание	Местное	Местное	Дистанционное	От электросети, автономное

1.3. Достоинства и недостатки оптических кабелей

Наряду с экономией цветных металлов, и в первую очередь меди, оптические кабели обладают следующими достоинствами:

малыми потерями и соответственно большими длинами ретрансляционных участков (30...70 и 100 км);

широкополосностью (возможностью передачи информации по нескольким тысячам каналов);

малыми габаритными размерами и массой (в 10 раз меньшими, чем у электрических кабелей);

высокой защищенностью от внешних воздействий и переходных помех; надежной техникой безопасности (отсутствие искрения и короткого замыкания).

К недостаткам оптических кабелей можно отнести подверженность волоконных световодов радиации, за счет которой появляются пятна затемнения и возрастает затухание, а также водородную коррозию стекла, приводящую к микротрещинам световодов и ухудшению их свойств.

В табл. 1.2 приведены сравнительные данные электрических кабелей с медными проводниками и оптических кабелей со стеклянными волокнами.

Таблица 1.2

Характеристика	Электрические кабели	Оптические кабели
Уровень потерь	Высокий	Низкий
Расстояние между ретрансляторами, км	3...20	До 100 км
Помехоустойчивость	Низкая	Высокая
Влияние повышения температуры на затухание	Затухание возрастает	Не влияет
Заземление	Необходимо	Не требуется
Утечка информации	Возможна	Сильно затруднена
Влияние коррозии	Подвержены	Не подвержены
Влияние электромагнитного импульса (ЭМИ)	Подвержены	Не подвержены
Масса	Большая	Малая
Тенденция к снижению стоимости	Не ожидается	Прогрессирует

1.4. Техничко-экономическая эффективность оптических кабелей

Сравнение оптических кабелей с электрическими кабелями (симметричными и коаксиальными), а также другими направляющими системами передачи (волноводами, сверхпроводящими кабелями, воздушными линиями) дано в табл. 1.3.

Коаксиальный кабель используется в диапазоне 60...100 МГц для дальней связи и телевидения, а также в диапазоне до 1000 МГц в качестве антенно-фидерных радиоустройств.

Оптические кабели могут рассматриваться как перспективное средство передачи широкополосной информации в узконаправленном луче оптического диапазона (10^{14} Гц). Их достоинством являются малые потери, высокая помехоустойчивость, небольшие масса и габаритные размеры. Кроме того, они изготавливаются большими строительными длинами и без применения металлов.

Хорошим средством для передачи широкополосной информации является

Таблица 1.3

Направляющая система	Потери	Внешнее поле	Диапазон частот, Гц	Число каналов (примерно)	Длина участка, км	Область применения
Воздушная линия	В металле и диэлектрике	Есть	До 10^5	10	100	Зонавая связь
Симметричный кабель	То же	»	До 10^6	100	5...20	Городская и зонавая связь
Коаксиальный кабель	»	Нет	До 10^8	1000—5000	3...6	Магистральная связь
Сверхпроводящий кабель	В диэлектрике	»	До 10^9	1000—5000	100	—
Волновод	В металле	»	$10^{10}...10^{11}$	10 000	—	—
Оптический кабель	В диэлектрике	»	$10^{14}...10^{16}$	10 000	30...100	Городская и междугородная связь

также цилиндрический волновод при использовании волны H_{01} . Такой волновод позволяет получить большое число телефонных и телевизионных каналов. Существенными недостатками волноводов являются громоздкость конструкции и малые строительные длины.

Симметричные цепи (воздушные линии и симметричные кабели) широко используются для дальней и местной связи в ограниченном диапазоне частот (как правило, до 1 МГц). Этим цепям свойственны все недостатки открытых систем — большие потери энергии и плохая защищенность от взаимных и внешних помех.

Сверхпроводящие кабельные линии связи являются перспективными средством передачи различной современной информации на большие расстояния, однако в настоящее время их технико-экономическая эффективность невелика.

Оценивая различные направляющие среды по частотному диапазону использования, затуханию, защищенности от внешних помех и технико-экономическим показателям, можно признать, что наилучшими являются коаксиальный и оптический кабели из-за большой пропускной способности, помехозащищенности и малого затухания.

Из рис. 1.3 видна вполне обоснованная закономерность снижения стоимости 1 кан.-км связи с увеличением числа каналов. Стоимость канала обратно пропорциональна корню из числа каналов, т. е. $1/\sqrt{N}$. В этом плане имеется прямая связь между экономичностью системы и ее широкополосностью. Как видно из рисунка, самой дешевой является связь по световоду и волноводу, затем по коаксиальному кабелю и, наконец, самой дорогой

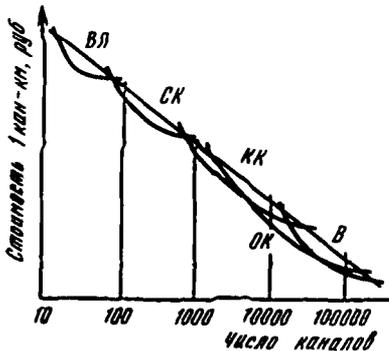


Рис. 1.3. Эффективность различных направляющих систем

(ВЛ — воздушная линия; СК — симметричный кабель; КК — коаксиальный кабель; ОК — оптический кабель; В — волновод)

является связь по воздушным линиям. Из рисунка видно, что по сравнению с симметричными коаксиальными кабелями эффективны, начиная с 600 каналов связи. Область их эффективного использования распространяется до 10 000 каналов. Оптические кабели целесообразно применять при потребности в 1000 и более каналах и во всех случаях, когда ограничены ресурсы меди.

Объективным критерием оценки любой системы передачи информации принято считать произведение пропускной способности линии ΔF на длину трансляционного участка L , т. е. $\rho = \Delta FL$. Для различных типов направляющих систем эти данные приведены в табл. 14.

Таблица 14

Параметр	ВЛ	СК	КК	ОК		СПК
				МОВ	ООВ	
ΔF , Гц	10^5	10^6	10^8	10^8	10^8	10^8
L , км	100	20	3	30	100	100
ρ , Гц·км	10^7	2×10^7	3×10^8	3×10^9	10^{11}	10^{10}

Примечание. МОВ и ООВ — соответственно многомодовое и одномодовое волокно. СПК — сверхпроводящие кабели.

Имея в виду, что основные потребности нашей страны в каналах связи на обозримую перспективу находятся в пределах эффективного применения коаксиальных кабелей, им совместно с радиорелейными линиями отводится в ЕАСС* основная роль при создании магистральной связи страны. Однако, учитывая высокие достоинства оптических кабелей, они получают все возрастающее применение на сетях связи.

Глава 2

Основы передачи информации по оптическим кабелям

2.1. Физические процессы в волоконных световодах

В отличие от обычных кабелей, обладающих электрической проводимостью и током проводимости $I_{пр}$, оптические кабели имеют совершенно другой механизм передачи энергии, а именно токи смещения $I_{см}$, на основе которых действует также радиопередача. Отличие от радиопередачи состоит в том, что волна распространяется не в свободном пространстве, а концентрируется в самом объеме световода и передается по нему в заданном направлении (рис. 21). Передача волны по световоду осуществляется за счет ее отражений от границы сердцевины и оболочки, имеющих разные показатели преломления (n_1 и n_2).

В широко применяемых в настоящее время симметричных и коаксиальных кабелях передача осуществляется по двухпроводной схеме с применением прямого и обратного проводников цепи (рис. 22, а). Так же работают воздушные линии и сверхпроводящий кабель. В световодах, волноводах и других направляющих системах (НС) нет двух проводников и передача происходит волноводным методом по закону многократного отражения волны от границы раздела сред (рис. 22, б). Такой отражающей границей может быть металл—диэлектрик, диэлектрик—диэлектрик с различными ди-

* В настоящее время термин «Единая автоматизированная сеть связи» (ЕАСС) заменен на термин «Взаимоувязанная сеть связи» (ВСС), что следует иметь в виду здесь и далее по всей книге.

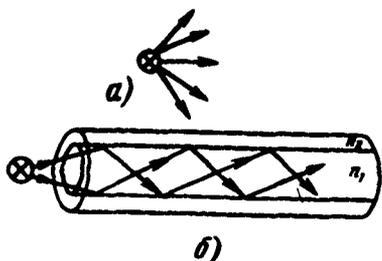


Рис. 2.1. Радиопередача (а) и передача по волоконному световоду (б)

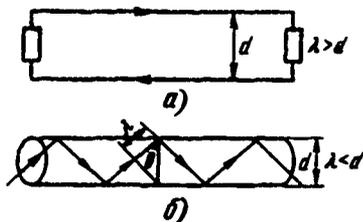


Рис. 2.2. Передача энергии по двухпроводным (а) и волноводным (б) направляющим средам

электрическими (оптическими) свойствами. На волноводном принципе действует световод, волновод, диэлектрический волновод и другие конструкции направляющих систем.

Граница раздела двухпроводных (двухсвязных) и волноводных (односвязных) направляющих систем характеризуется в первую очередь соотношением между длиной волны λ и поперечными размерами направляющей системы d . При $\lambda > d$ требуется два провода: прямой и обратный, и передача происходит по обычной двухпроводной схеме. При $\lambda < d$ не требуется двухпроводной системы, и передача происходит за счет многократного отражения волны от границ раздела

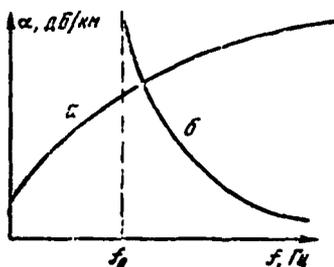


Рис. 2.3. Затухание сигнала в двухпроводных (а) и волноводных (б) средах

волна HE_{11} в световоде не имеет критической частоты). Двухпроводные системы свободны от этих ограничений и способны передавать весь диапазон частот от нуля и выше. Правда, потери и затухание в них больше.

В табл. 2.1 приведена частотно-волновая классификация применяемых в настоящее время направляющих систем.

Поэтому передача по волноводным системам (световодам, волноводам и другим НС) возможна лишь в диапазоне очень высоких частот, когда длина волны меньше, чем поперечные размеры (диаметр) НС.

Особенности различных направляющих систем связаны с частотными ограничениями при передаче энергии в различных средах (рис. 2.3). Принципиально различен частотный диапазон передачи по волноводным и двухпроводным системам. Волноводные системы имеют частоту отсечки — критическую частоту f_0 ведут себя как фильтры ВЧ, и по ним возможна лишь передача волн длиной меньше чем λ_0 (только волна HE_{11} в световоде не имеет критической частоты).

Таблица 2.1

Параметр	ВЛ	СК	КК	СПК	В	ОК
f , Гц	10^5	10^6	10^8	10^9	$10^{10} \dots 10^{11}$	$10^{14} \dots 10^{15}$
λ	км	100 м	м	м	мм	мкм
Число каналов	Десятки	Сотни	Ты-сячи	Ты-сячи	—	Десятки тысяч

Из таблицы видно, что воздушная линия, симметричный, коаксиальный и сверхпроводящий кабели используются на волнах длиной больше поперечных размеров направляющей системы ($\lambda > d$), и поэтому они действуют на основе токов проводимости по двухпроводной схеме. Волновод и оптический кабель работают на очень коротких волнах ($\lambda < d$), и поэтому они действуют на основе токов смещения волноводным методом. Как видно из таблицы, оптические кабели используются в очень широком диапазоне частот, что позволяет организовать с их помощью большое число каналов различного назначения.

Частоты и волны, используемые для передачи различных видов информации, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тип волны	f	λ	Область применения
ДВ, СВ, КВ	ВЧ (до 300 МГц)	км, м	Электросвязь, радиосвязь
УКВ	СВЧ (0,3...300 ГГц)	дм, см, мм	Радиосвязь, РРЛ, СЛ
ОВ	Оптическая (3...3000 ГГц)	мкм	Оптическая связь

Электросвязь по кабелям и радиосвязь работают в метровом и километровом диапазонах волн. Радиорелейные линии (РРЛ) и спутниковые линии (СЛ) используют преимущественно сантиметровый диапазон волн. Оптическая связь работает в микрометровом диапазоне.

Оптические микронные волны подразделяются на три диапазона: инфракрасный (ИКЛ), видимый (ВЛ) и ультрафиолетовый (УФЛ) (табл. 2.3).

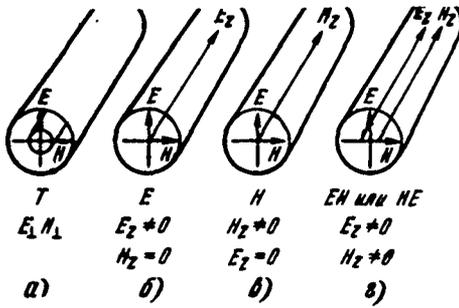
Таблица 2.3

Вид лучей	ИКЛ	ВЛ	УФЛ
f , Гц	$10^{13} \dots 10^{14}$	$10^{14} \dots 10^{15}$	$10^{15} \dots 10^{17}$
λ , мкм	0,75...100	0,4...0,75	0,01...0,4

В настоящее время используются в основном волны длиной 0,7...1,6 мкм и ведутся работы по освоению ближнего инфракрасного диапазона (2, 4, 6 мкм).

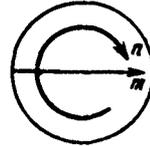
2.2. Волновая и лучевая трактовки световых процессов

Как известно, свет имеет двойственную природу: волновую и лучевую (корпускулярную). Волновая теория света обосновывает, что все свойства света совпадают со свойствами электромагнитных волн и свет является разновидностью электромагнитных колебаний очень высоких частот ($10^{14} \dots 10^{15}$ Гц) и очень коротких волн (микрометры). Волны подразделяются на классы и типы. Классы волн приведены на рис. 2.4. Тип волны (мода) определяется сложностью структуры, т. е. числом максимумов и минимумов поля в поперечном сечении. Мода обозначается двумя числовыми индексами n и m (E_{nm} и H_{nm}). Индекс n обозначает число полных изменений поля по окружности световода, а индекс m — число изменений поля по диаметру (рис. 2.5).



← Рис. 24. Классы волн:
 а — поперечная; б — электрическая;
 в — магнитная; г — гибридная

Рис. 25. Типы волн



По корпускулярной теории свет — это поток быстро движущихся мелких частиц (корпускул), которые излучаются отдельными порциями (квантами) и образуют луч света. Здесь пригодна лучевая теория.

Таким образом, теория света является синтезом волновых и лучевых его свойств. Одноволновая (одномодовая) передача соответствует одному лучу, а многоволновая (многомодовая) — большому количеству лучей. На рис. 2.6 показана одномодовая ($N=1$) и многомодовая ($N=3$) схемы передачи. Наряду с волновой схемой здесь приведена лучевая схема, из которой видно, что одномодовой передаче соответствует один луч, а многомодовой в данном примере — три луча.

Установлено, что по световодам передается фиксированное число волн (мод), которое зависит от соотношения диаметра сердцевинки d и длины волны λ . С увеличением диаметра световода число передаваемых мод резко возрастает. Существующие волоконные световоды (ВС) диаметром 50 мкм являются многомодовыми. Для обеспечения одномодового режима передачи необходимо иметь очень малый диаметр сердцевинки световода — порядка 8...10 мкм. При многомодовой передаче пути следования различных лучей различны (рис. 2.6) и они приходят к концу линии в различные отрезки времени (t_1, t_2, t_3). В результате их суммирования на приеме импульс растекается и искажается (дисперсия). Это приводит к ограничению пропускной способности линии ΔF и дальности передачи l по ней.

При одномодовой передаче распространяется лишь один луч, и поэтому форма сигнала практически сохраняется, что позволяет осуществлять широкополосную связь на большие расстояния. В настоящее время принято одномодовую передачу осуществлять на гибридной волне HE_{11} , обладающей способностью передавать сигнал во всем диапазоне частот без отсечки. У этой волны магнитные линии в горизонтальной плоскости имеют такую же структуру, как электрические в вертикальной плоскости.

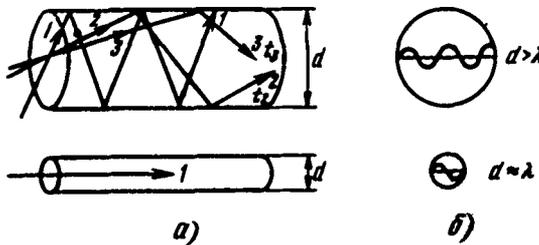


Рис. 2.6. Лучевая (а) и волновая (б) схемы передачи по волоконному световоду

2.3. Типы волоконных световодов и принцип их действия

Основным элементом оптического кабеля является волоконный световод, выполненный в виде тонкого стеклянного волокна цилиндрической формы, по которому осуществляется передача микронных длин волн, что соответствует диапазону частот $10^{14} \dots 10^{15}$ Гц.

Оптическое волокно, как правило, имеет двухслойную конструкцию и состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления n_1 и n_2 (где $n = \sqrt{\mu\epsilon}$), причем $n_1 > n_2$.

Оптические волокна классифицируются на две группы: *одномодовые* и *многомодовые*, причем последние подразделяются на *ступенчатые* и *градиентные* (рис. 2.7). В одномодовых ОВ диаметр сердцевины соизмерим с длиной волны ($d \approx \lambda$) и по нему передается лишь один луч — тип волны (мода). В многомодовых ОВ диаметр сердцевины больше, чем длина волны ($d > \lambda$), и по нему распространяется большое число лучей (мод). Практически сердцевина ОВ составляет 8...10 мкм у одномодовых и 50 мкм у многомодовых волокон. Снаружи располагается двухслойное покрытие: лаковое (эпоксипакрилат) и полимерное (фторопласт, нейлон).

Как видно из рис. 2.7, ход лучей в различных ОВ различен. В ступенчатом многомодовом волокне лучи резко отражаются от границы сердцевины—оболочка. Причем пути следования различных лучей различны, и поэтому они приходят к концу линии со сдвигом по времени. Это приводит к искажению передаваемого сигнала (дисперсии).

Градиентные ОВ также являются многомодовыми. Однако здесь лучи распространяются по волнообразным траекториям, и поэтому они с меньшим разбросом по времени приходят к концу линии.

Одномодовые ОВ обладают наилучшими характеристиками, так как здесь распространяется только один луч.

Для параболического распределения показателя преломления закон изменения n_r по радиусу определяется выражением

$$n_r = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

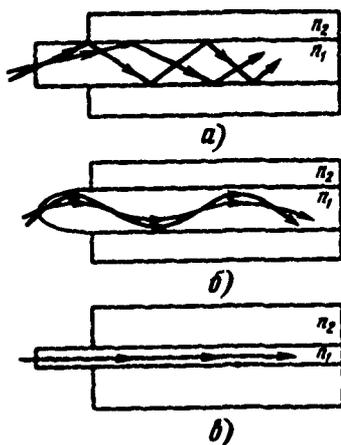


Рис. 2.7. Волоконные световоды: ступенчатые, многомодовые (а); градиентные (б); одномодовые (в)

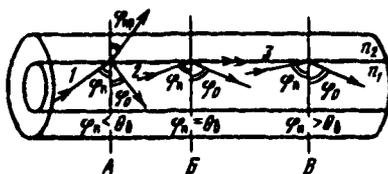


Рис. 2.8. Прохождение лучей в световоде

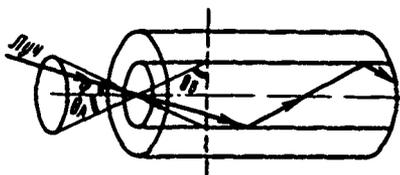


Рис. 2.9. Апертура волоконного световода

где r — текущий радиус; a — радиус сердечника; n_0 — показатель преломления в центре сердечника (примерно 1,5), $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 = (n_1 - n_2) / n_1 = 0,003 - 0,01$ — отношение показателей преломления. Значения Δ при $n_1 = 1,51$ и различных величинах n_2 приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

n_2	1,49	1,495	1,5	1,505
Δ	0,013	0,0099	0,0066	0,0033

Сердцевина служит для передачи электромагнитной энергии, назначение оболочки в основном для создания лучших условий отражения на границе сердечника—оболочка и защиты от излучения энергии в окружающее пространство

2.4. Апертура волоконного световода

Апертура — это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения

Учитывая, что в световоде границей раздела сред сердцевина — оболочка являются прозрачные стекла, возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения и апертуру. Реализация этого условия применительно к двухслойному световоду показана на рис. 2.8

По законам геометрической оптики в общем виде на границе сердечник—оболочка будет падающая волна с углом φ_n , отраженная с углом φ_0 и преломленная волна с углом φ_{np} (рис. 2.8, точка А). Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, т. е. при $n_1 > n_2$, волна при определенном угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду (рис. 2.8, точка В). Угол падения φ_n , начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, т. е. при $\varphi_n = \theta_n$, называется *углом полного внутреннего отражения*

$$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1}}$$

где μ и ϵ — соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости сердечника (μ_1, ϵ_1) и оболочки (μ_2, ϵ_2). При $\varphi_n = \theta_n$ преломленный луч проходит вдоль границы раздела сердцевина—оболочка и не излучается в окружающее пространство (рис. 2.8, луч 2 в точке В)

При $\varphi_n > \theta_n$ энергия, поступившая в сердечник, полностью отражается и распространяется по световоду (рис. 2.8, луч 3 в точке В). Чем больше угол падения волны, т. е. $\varphi_n > \theta_n$, в пределах от θ_n до 90° , тем лучше условия распространения и тем быстрее волна придет к приемному концу. В этом случае вся энергия концентрируется в сердечнике световода и практически не излучается в окружающую среду. При падении луча под углом, меньшим угла полного отражения, т. е. $\varphi_n < \theta_n$, энергия проникает в оболочку, излучается во внешнее пространство и передача по световоду неэффективна (рис. 2.8, луч 1 в точке А)

Режим полного внутреннего отражения предопределяет условие подачи света на входной торец волоконного световода. Как видно из рис. 2.9, световод пропускает лишь свет, заключенный в пределах телесного угла

θ_A , величина которого обусловлена углом полного внутреннего отражения θ_A . Этот телесный угол θ_A характеризуется числовой апертурой $NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Значения числовой апертуры при $n_1 = 1,51$ в различных значениях n_2 приведены в табл. 2.5. В действующих технических условиях $NA \approx 0,2$.

Таблица 2.5

n_2	1,49	1,495	1,5	1,505
NA	0,245	0,212	0,173	0,123

Как видно из рис. 2.9 между углами полного внутреннего отражения θ_A и апертурным углом падения луча θ_A имеется взаимосвязь. Чем больше угол θ_A , тем меньше апертура волокна θ_A . Следует стремиться к тому, чтобы угол падения луча на границу сердцевинки—оболочка φ был больше угла полного внутреннего отражения θ_A и находился в пределах от θ_A до 90° , а угол ввода луча в торец световода φ укладывался в апертурный угол θ_A ($\varphi < \theta_A$).

2.5. Основное уравнение передачи

В волновой трактовке процесс передачи световых сигналов рассматривается как разновидность распространения электромагнитных волн. Математические решения получают из электродинамических уравнений Максвелла. Решение этих уравнений приводит к цилиндрическим функциям Бесселя $J(g_1 r)$ для сердцевинки и Ганкеля $H(g_2 r)$ для оболочки.

Продольные электрические и магнитные составляющие для сердцевинки с радиусом a ($r < a$) имеют следующий вид:

$$E_z = A_n J_n(g_1 r) e^{j n \varphi} e^{-\beta z}, \quad H_z = B_n J_n(g_1 r) e^{j n \varphi} e^{-\beta z},$$

где $g_1^2 = k_1^2 - \beta^2$ — поперечная составляющая волнового числа сердцевинки; $k_1 = \omega \sqrt{\mu_{a1} \epsilon_{a1}} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\mu_{r1}} = k_0 n_1 = 2\pi n_1 / \lambda$ — волновое число сердцевинки; β — коэффициент распространения в световоде; A_n, B_n — постоянные интегрирования.

Продольные составляющие для оболочки ($r > a$) имеют вид

$$E_z = C_n H_n^{(1)}(J g_2 r) e^{j n \varphi} e^{-\beta z},$$

$$H_z = D_n H_n^{(1)}(J g_2 r) e^{j n \varphi} e^{-\beta z},$$

где $g_2^2 = \beta^2 - k_2^2$ — поперечная составляющая волнового числа оболочки; $k_2 = \omega \sqrt{\mu_{a2} \epsilon_{a2}} = 2\pi n_2 / \lambda$ — волновое число оболочки; β — коэффициент распространения в световоде (коэффициент фазы); C_n, D_n — постоянные интегрирования.

Определив по известным соотношениям поперечные составляющие $E_r, E_\varphi, H_r, H_\varphi$ и используя равенство тангенциальных составляющих на границе раздела сердцевинка — оболочка ($r = a$), получим следующие характеристические уравнения:

для симметричных волн:

$$\frac{1}{g_1 a} \frac{J_1(g_1 a)}{J_0(g_1 a)} = \frac{1}{k_2 a} \frac{K_1(g_2 a)}{K_0(g_2 a)} \quad \text{для } H_{0m} \text{ волн.}$$

$$\frac{n_1^2 J_1(g_1 a)}{g_1 a J_0(g_1 a)} = \frac{n_2^2 F_1(g_2 a)}{J g_2 a K_0(g_2 a)} \text{ для } E_{0m} \text{ волн.}$$

для несимметричных гибридных волн

$$\frac{1}{g_1 a} \frac{J_{n-1}(g_1 a)}{J_n(g_1 a)} = \pm \frac{1}{g_2 a} \frac{K_{n-1}(g_2 a)}{K_n(g_2 a)}.$$

где верхняя строка индекса относится к модам HE_{nm} , а нижняя — к модам E_{nm} ; $K_n(g_2 a) = H(jg_2 a)$ — модифицированная функция Ганкеля.

Для одномодовой системы ($n=1$), которая работает на гибридной волне HE_{11} , характеристическое уравнение имеет весьма простую форму

$$g_1 \frac{J_1(g_1 a)}{J_0(g_1 a)} = g_2 \frac{K_1(g_2 a)}{K_0(g_2 a)}.$$

Данные характеристические уравнения позволяют определить структуру поля, свойства волн и основной параметр передачи по световоду — коэффициент распространения β .

2.6. Критические длины волн и частоты

Световоды, как и волноводы, имеют частоту отсечки (критическую частоту f_0), и по ним возможна передача лишь волн длиной меньше диаметра сердцевинки световода ($\lambda < d$).

Суммируя ранее приведенные значения поперечных составляющих g сердцевинки и оболочки, получаем $g_1^2 + g_2^2 = k_1^2 - k_2^2 = k_0(n_1^2 - n_2^2)$, где $k_0 = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$.

Для определения критической частоты f_0 надо принять $g_2 = 0$, так как при значениях $g_2 > 0$ поле концентрируется в сердцевине световода, а при $g_2 = 0$ оно выходит из сердцевинки и процесс распространения по световоду прекращается. Тогда $g_1^2 = k_0(n_1^2 - n_2^2)$. Подставив сюда значение $k_0 = 2\pi f/c$, получим критическую частоту $f_0 = g_1 c / 2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Умножив числитель и знаменатель на радиус сердцевинки a , получим

$$f_0 = g_1 c a / \pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Соответственно критическая длина волны

$$\lambda_0 = \frac{v_1}{f_0} = \frac{\pi d}{g_1 a n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где $g_1 a = p_{nm}$ — параметр, характеризующий тип волны (моду). Значения p_{nm} для различных типов волн приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

n	Значение p_{nm} при m			Тип волны
	1	2	3	
0	2,405	5,520	8,654	E_{0m}, H_{0m}
1	0,000	3,832	7,016	HE_{1m}
1	3,832	7,016	10,173	HE_{1m}
2	2,445	5,538	8,665	HE_{2m}
2	5,136	8,417	11,620	HE_{2m}

Из формулы видно, что чем толще сердцевина световода и чем больше отличаются n_1 и n_2 , тем больше критическая длина волны λ_0 и ниже критическая частота световода f_0 .

Критические частоты f_0 и длины волн λ_0 для различных типов волн P_{nm} и диаметра сердцевины d приведены в табл. 2.7 и 2.8 ($n_1=1,51$ и $n_2=1,5$).

Таблица 2.7

P_{nm}	Критическая частота, 10^{10} Гц, для d , мкм				
	8	10	40	50	100
2,405	18,4	14,7	3,32	2,66	1,33
3,83	26,8	21,1	5,29	4,23	2,12

Таблица 2.8

P_{nm}	Критическая длина волны, мкм, для d , мкм				
	8	10	40	50	100
2,405	1,15	1,45	5,98	7,5	14,9
3,83	0,75	0,94	3,76	4,7	9,39

Лучевая трактовка наличия λ_0 и f_0 иллюстрируется рис. 2.10, на котором показан процесс распространения меридиональных лучей по двухслойному волоконному световоду (ВС). Здесь луч образует с поперечным сечением световода угол θ и многократно отражается от границы сердечник-оболочка под углом 2θ .

На рис. 2.10 показаны предельные случаи распространения малых длин волн ($\lambda \rightarrow 0$) (рис. 2.10, а) и волн, соизмеряемых с диаметром световода ($\lambda \rightarrow d$) (рис. 2.10, б). В первом случае ($\lambda \rightarrow 0$ и $f \rightarrow \infty$) угол $\theta \rightarrow 90^\circ$, т. е. отражений мало, волна стремится к прямолинейному движению вдоль световода и передача по световоду проходит в выгодных условиях. Во втором случае ($\lambda \rightarrow d$ и $f \rightarrow \frac{c}{d}$) угол $\theta \rightarrow 0^\circ$, т. е. волна испытывает большое число отражений, поступательное движение ее весьма мало и вдоль световода передается незначительная доля энергии.

При определенной длине волны (рис. 2.10, в) наступает такой режим, когда $\theta = 0^\circ$, т. е. волна падает на оболочку световода и отражается перпендикулярно. В световоде устанавливается режим стоячей волны, и энергия вдоль световода не распространяется. Это соответствует случаю критической длины волн $\lambda_0 \approx d$ и критической частоты $f_0 \approx c/\lambda_0 = c/d$. Поэтому по ВС возможна передача лишь волн длиной меньше диаметра световода ($\lambda < d$).

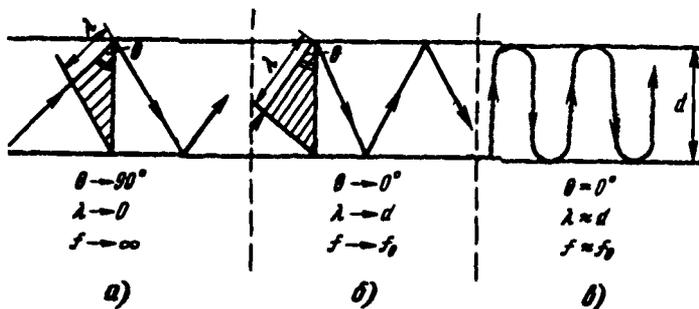


Рис. 2.10. Распространение волны в волоконном световоде для частот: а — очень высоких; б — менее высоких; в — критических

2.7. Нормированная частота

Важнейшим обобщенным параметром волоконного световода, используемым для оценки его свойств, является нормированная частота V . Она определяется суммированием ранее приведенных аргументов цилиндрических функций для сердцевины (g_1a) и оболочки (g_2a):

$$V = \sqrt{(g_1a)^2 + (g_2a)^2} = \sqrt{(k_1^2 - \beta^2) + (\beta^2 - k_2^2)} = \sqrt{k_1^2 - k_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

где a — радиус сердцевины волокна; n_1 — показатель преломления сердцевины; n_2 — то же, оболочки.

В табл. 2.9 приведены значения нормированной частоты V при различных радиусах сердцевины волокна a , длины волны λ ($n_1 = 1,51$). Из таблицы видно, что с увеличением радиуса сердцевины волокна величина V растёт, а с увеличением λ уменьшается.

Таблица 2.9

λ , мкм	Значение V при a , мкм							
	4		5		25		50	
	n_2							
	1,49	1,5	1,49	1,5	1,49	1,5	1,49	1,5
0,85	7,24	5,1	9,05	6,2	45,2	32,1	90,5	63,9
1,00	6,15	4,2	7,69	5,2	38,5	27,1	76,9	54,3
1,30	4,73	3,2	5,92	4,1	29,3	21,4	59,2	41,8
1,55	3,97	2,7	4,96	3,4	25,2	17,6	49,6	35,1

Выше показано, что при критической частоте $g_2^2 = \beta^2 - k_2^2 = 0$. Тогда $\beta = k_2$ или $\beta/k = n_2$, где $k = 2\pi/\lambda$.

На рис. 2.11 приведены зависимости значений β/k от нормированной частоты для различных типов волн. Значение нормированной частоты отсечки V_0 соответствует точке пересечения каждой кривой с осью V . В этом случае при $\beta/k = n_2$ поле излучается из световода и процесс распространения по нему прекращается. Из рисунка видно, что только одна одномодовая волна HE_{11} не имеет критической частоты. Для нее нормированная частота находится в пределах $0 < V < 2,405$

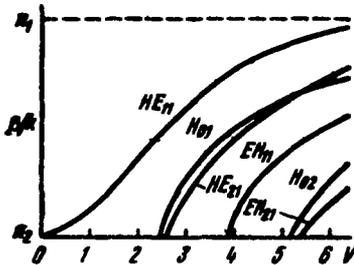


Рис. 2.11. Зависимости β/k от нормированной частоты для различных типов волн

или $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405$. Из

формулы видно, что чем меньше разность $\Delta n = n_1 - n_2$, тем при большем радиусе световода обеспечивается одномодовый режим. Так, если $n_1 = 1,46$, то при $\Delta n = 0,01$ радиус $a < 2,24\lambda$, а при $\Delta n = 0,003$ получим $a < 4,09\lambda$. То есть в последнем случае одномодовая передача реализуется при диаметре сердцевины $d = 8,2\lambda$, что соответствует для длины волны 1,3 мкм диаметру 10,7 мкм.

2.8. Число мод

Существующие конструкции ВС с диаметром сердцевинки 50 мкм являются многомодовыми системами, и по ним распространяется большое число волн. В общем виде число мод в ВС определяется по формуле

$$N = V^2/2 \left(1 + \frac{2}{n} \right),$$

где $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ — нормированная частота; n — показатель степени изменения профиля показателя преломления. Тогда для ступенчатого ВС ($n = \infty$) $N = V^2/2$, а для градиентного ВС ($n = 2$) $N = V^2/4$. Из формулы видно, что чем больше диаметр сердцевинки ВС и меньше длина волны, тем больше возникает мод. Причем в градиентных ВС число мод в 2 раза меньше, чем в ступенчатых. Это положение иллюстрируется табл. 2.10.

Таблица 2.10

мкм	Число мод ВС при радиусе a сердцевинки, мкм					
	20		30		50	
	ступенчатом	градиентном	ступенчатом	градиентном	ступенчатом	градиентном
0,85	326	163	734	367	2042	1021
1,00	236	118	531	265	1475	737
1,30	139	70	314	150	873	436
1,55	98	49	221	110	614	307

2.9. Типы волн в световоде

В общем случае в волоконном световоде могут существовать три типа волн: направляемые, вытекающие и излучаемые (рис. 2.12). Действие и преобладание какого-либо типа волн связано в первую очередь с апертурой, соотношением углов падения волны φ и полного внутреннего отражения θ_c .

Направляемые волны (НВ) (волны сердцевинки) — это основной тип волны, распространяющейся по световоду. Здесь вся энергия сосредоточена

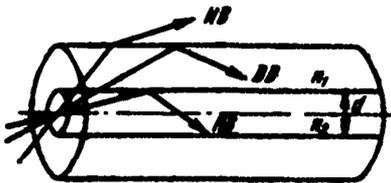


Рис. 2.12. Типы волн в волоконном световоде



Рис. 2.13. Области существования различных типов волн

внутри сердцевин световода и обеспечивает передачу информации. Направляемые волны возбуждаются при вводе лучей в торец световода под углом, большим угла полного отражения ($\varphi > \theta_n$), т. е. в пределах апертурного угла.

Излучаемые волны (ИВ) (пространственные волны) возникают при вводе лучей под углом, меньшим угла полного отражения ($\varphi < \theta_n$), т. е. вне апертуры. Здесь вся энергия уже в начале линии излучается в окружающее пространство и не распространяется вдоль световода, что связано с дополнительными потерями энергии. Излучаемые волны и рассеяние энергии также возникают в местах нерегулярностей световодов.

При **вытекающих волнах (ВВ)** (волнах оболочки) энергия частично распространяется вдоль световода, а часть ее переходит в оболочку и излучается в окружающее пространство. Вытекающие волны образуются в первую очередь за счет косых лучей, не проходящих через ось световода.

Излучаемые и вытекающие волны — это паразитные волны, приводящие к рассеянию энергии и искажению за счет интерференции передачи по световоду. В первую очередь из-за этих волн возникают переходные влияния и помехи в соседних световодах.

На рис. 2.13 показаны области существования различных типов волн в зависимости от значения величины β — коэффициента фазы для направляемых волн, распространяющихся внутри сердцевин, $k_2^2 < \beta^2 < k_1^2$;

для вытекающих волн, распространяющихся как внутри сердцевин так и внутри оболочки, $(k_2^2 - \frac{m^2}{a^2}) < \beta^2 < k_2^2$;

для излучаемых волн, распространяющихся в окружающем пространстве, $\beta^2 < (k_2^2 - \frac{m^2}{a^2})$, где m — азимутальное модовое число; a — радиус световода; $k_1 = kn_1$ и $k_2 = kn_2$ — волновые числа сердцевин и оболочки.

Для меридиональных волн, имеющих симметричное поле, азимутальное модовое число $m = 0$, и тогда для ВВ $k_2^2 < \beta^2 < k_1^2$ и для ИВ $\beta^2 < k_2^2$.

2.10. Затухание

Оптические кабели характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией.

Затухание α определяет длину регенерационных участков (расстояние между регенераторами) и для трактов оптических кабелей обусловлено собственными потерями в волоконных световодах α_0 и дополнительными потерями, так называемыми кабельными α_k , обусловленными скруткой, а также деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления оптического кабеля.

Собственные потери волоконных световодов состоят в первую очередь из потерь поглощения α_n и потерь рассеяния α_p . Механизм потерь, возникающий при распространении по волоконному световоду электромагнитной энергии, иллюстрируется на рис. 2.14. Часть мощности, поступающей на вход световода, рассеивается вследствие изменения направления распространения лучей на нерегулярностях и их высвечивания в окружающее пространство (α_p), другая часть мощности поглощается посторонними примесями, выделяясь в виде джоулева тепла ($\alpha_n + \alpha_{пр}$). Такими примесями являются ионы металлов (никель, железо, кобальт и др.) и гидроксильные группы (ОН), приводящие к появлению резонансных всплесков затухания.

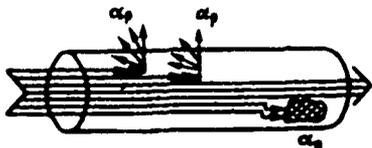


Рис. 2.14. Механизм потерь в световодах

Потери на поглощение зависят от чистоты материала и при наличии посторонних примесей (α_{np}) могут достигать значительной величины ($\alpha_n + \alpha_{np}$).

Потери на рассеяние лимитируют предел минимально допустимых значений потерь в волоконных световодах. В результате $\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{np} + \alpha_k$.

Затухание за счет поглощения, дБ/км, связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала световода ($\text{tg } \delta$) и рассчитывается по формуле

$$\alpha_n = 8.69 \frac{\pi n}{\lambda} \text{tg } \delta.$$

где n — показатель преломления; $\text{tg } \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь в световоде.

Потери рассеяния обусловлены неоднородностями материала волоконного световода, расстояния между которыми меньше длины волны, и тепловой флуктуацией показателя преломления. Величина потерь на рассеяние, дБ/км, называемое *рэлеевским*, определяется по формуле

$$\alpha_p = K_p / \lambda^4,$$

где K_p — коэффициент рассеяния, для кварца равный 0,8 ($\text{мкм}^4 \cdot \text{дБ}$)/км.

Потери на рэлеевское рассеяние определяют нижний предел потерь, присущих волоконным световодам. Этот предел различен для различных волн и с увеличением длины волны уменьшается.

На рис. 2.15 представлены частотные зависимости коэффициента затухания волоконного световода. Из рисунка видно, что потери на поглощение растут линейно с увеличением частоты, а потери на рассеяние существенно быстрее — по закону f^4 .

Таблица 2.11

Стекло	α , дБ/км	l_p , км
Оконное стекло	3000	0,01
Стекло для фото	300	0,1
Стекло:		
CG-1970	20	1,5
CG-1980	3	10
CG-1990	0,3	100

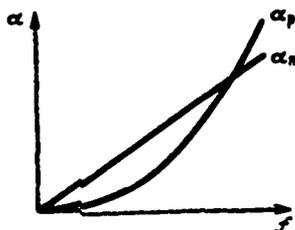


Рис. 2.15. Частотная зависимость затухания поглощения α_n и затухания рассеяния α_p

В табл. 2.11 приведены значения коэффициента затухания различных кварцевых стекол, а также длины регенерационных участков исходя из энергетического потенциала аппаратуры $\mathcal{E} = 30$ дБ. Тогда $l_p = 30/\alpha$. Из таблицы видно, что обычное оконное стекло за счет примесей имеет очень большое затухание и требует установки регенераторов через каждые 10 м. Начиная с 1970 г. качество стекла постоянно улучшается, и длина регенерационного участка доведена до 100 км. Сегодня известны стекла даже с затуханием 0,1...0,2 дБ/км.

При $\lambda > 2$ мкм начинают проявляться потери на поглощение передаваемой мощности. Это явление проявляется с ростом длины волны и углублением в инфракрасную область оптического спектра. Величина этих потерь α_{mk} пропорциональна показательной функции и уменьшается с ростом частоты по закону (дБ/км) $\alpha_{mk} = C e^{-k/\lambda}$, где C и k — постоянные коэффициенты (для кварца $k = (0,7-0,9) \times 10^{-6}$ м, $C = 0,9$).

На рис. 2.16 приведены типовые зависимости всех составляющих потерь от длины волны (α_p — поглощение; α_r — рассеяние; $\alpha_{пр}$ — примеси; $\alpha_{изк}$ — поглощение в инфракрасной области).

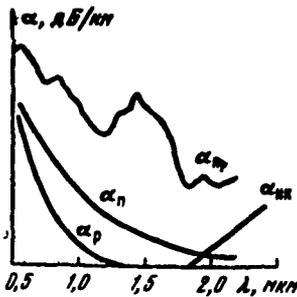


Рис. 2.16. Составляющие потерь энергии в волоконном световоде



Рис. 2.17. Затухание энергии в волоконном световоде при различных длинах волн

Как отмечалось, кроме собственных потерь α_0 следует учитывать дополнительные кабельные потери α_k , обусловленные деформацией оптических волокон в процессе изготовления кабеля (скруткой, изгибами, отклонениями от прямолинейности, а также термомеханическими воздействиями на волокна при наложении оболочек и покрытий и другими факторами, обусловленными технологией производства). Указанные дополнительные потери определяются в основном процессами рассеяния энергии на неоднородностях и частично увеличением потерь на поглощение. Скрутка, изгибы приводят в первую очередь к излучению энергии в местах изгиба и соответственно к возрастанию потерь.

Установлено, что кабельные потери приводят к увеличению затухания. Так, если собственное затухание световода составляет 1 дБ/км, то за счет дополнительных кабельных потерь оно может возрасти до 2...3 дБ/км и даже больше. При расчете оптических трактов следует также учитывать потери, вносимые сростками.

На рис. 2.17 приведены графики рэлеевского рассеяния 1, инфракрасного поглощения 2 и коэффициента затухания 3 реальных световодов с учетом потерь на поглощение и за счет примесей. Рэлеевское рассеяние α_r ограничивает нижний предел потерь в левой части графика, а инфракрасное поглощение $\alpha_{изк}$ — в правой. На графике явно видны три окна прозрачности световода. Наименьшее затухание ($\alpha=0,3$ дБ/км) имеется в третьем окне при $\lambda=1,55$ мкм. Причем с увеличением длины волны затухание снижается и соответственно увеличивается длина регенерационного участка (табл. 2.12). Из

Таблица 2.12

λ , мкм	α , дБ/км	l_p , км
0,85	2...3	10...15
1,30	0,7...1,0	30...40
1,35	0,3...0,4	70...100

Таблица 2.13

$tg \delta$	α_p , дБ/км, при λ , мкм		
	1,0	1,3	1,55
2×10^{-13}	8,200	6,300	5,300
2×10^{-14}	0,820	0,630	0,530
2×10^{-15}	0,082	0,063	0,053

Таблица 2.14

K_p	α_p , дБ/км, при λ , мкм		
	мкм		
	1,0	1,3	1,55
1,0	1,0	0,35	0,17
1,2	1,2	0,42	0,21
1,5	1,5	0,52	0,26

Таблица 2.15

$tg \delta$	α , дБ/км, при λ , мкм					
	1,0		1,3		1,55	
	и K_p					
	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
2×10^{-12}	9,20	9,70	6,65	6,68	5,47	5,56
2×10^{-14}	1,82	2,32	0,98	1,15	0,70	0,79
2×10^{-15}	1,08	1,58	0,41	0,58	0,22	0,31

таблицы видна явная целесообразность работы оптических кабелей на волнах 1,3 и 1,55 мкм.

В табл. 2.13—2.15 соответственно приведены расчетные данные потерь поглощения, рассеяния и суммарных потерь в зависимости от длины волны. Из таблиц видно, что затухание существенно зависит от качества стекла и его чистоты. Чем меньше диэлектрические потери $tg \delta$, тем меньше затухание.

В табл. 2.16 приведены значения коэффициента затухания в инфракрасном диапазоне.

Представляет интерес сопоставить частотные зависимости затухания оптических и электрических кабелей (рис. 2.18). Как видно из рисунка, коэффициент затухания электрических кабелей с медными проводниками (коаксиальных и симметричных) закономерно растет с частотой по закону \sqrt{f} . В оптических кабелях в весьма широкой полосе частот затухание стабильно. Поэтому можно увеличивать число каналов и мощность системы передачи без установки дополнительных усилительных пунктов.

Ранее рассматривались кварцевые волокна, область эффективного использования которых ограничивается диапазоном видимых и ближних инфракрасных волн длиной примерно до 2 мкм. Для инфракрасного диапазона средних и более длинных волн (до 10,6 мкм) необходимы новые щелочные материалы. Хорошие результаты дают галоидные, халькогенидные и фторидные стекла. Они обладают высокой прозрачностью и обеспечивают снижение потерь на 2—3 порядка по сравнению с кварцевыми стеклами.

На рис. 2.19 показана зависимость потерь в инфракрасном диапазоне от длины волны для различных материалов. Здесь представлены три диапазона волн: видимый и ближний (λ до 2 мкм); средний (λ от 2 до 5 мкм); дальний (λ до 10,6 мкм). В первом диапазоне волн эффективен кварц, во

Таблица 2.16

λ , мкм	1,6	2	3	4	5
α , дБ/км	0,16	0,22	0,4	0,6	0,85

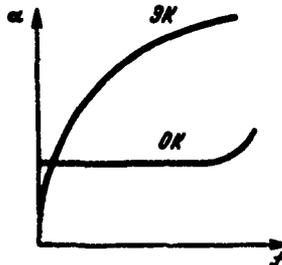


Рис. 2.18. Частотная зависимость затухания электрических и оптических кабелей

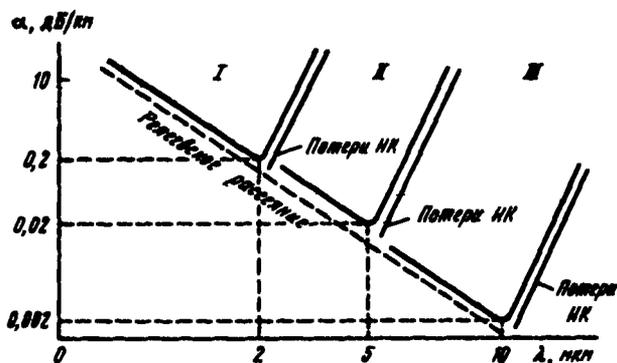


Рис. 2 19. Зависимости коэффициента затухания световодов, изготовленных из различных материалов, от длины волны:
I — кварц; II — фториды, III — халькогениды

втором — фториды, в третьем — галоиды и халькогениды. Из рисунка видно, что потери на релеевское рассеяние с увеличением длины волны резко снижаются обратно пропорционально четвертой степени длины волны ($\alpha_p \propto 1/\lambda^4$). Однако наряду с этим увеличиваются потери инфракрасного поглощения, возникающие из-за возбуждения инфракрасным излучением материала волокна.

Теоретическая граница потерь — это минимум на кривой потерь, образованной сложением кривых релеевского рассеяния и инфракрасного поглощения. В ближнем ИК диапазоне волны минимальные потери $\alpha \approx 0,2$ дБ/км, в диапазоне средних ИК волн потери снижаются на порядок ($\alpha = 0,02$ дБ/км), а в дальнем диапазоне — на два порядка ($\alpha = 0,002$ дБ/км).

С появлением волокон из новых материалов становится реальным создание волоконно-оптических линий связи через большие океанские просторы без ретрансляторов. Известны проекты строительства подводной оптической линии через Атлантический океан протяженностью 6000 км без регенераторов с применением волокон из тетрафторида циркония или фторида берилля.

2.11. Дисперсия

Наряду с затуханием пропускная способность ΔF является важнейшим параметром волоконно-оптических систем передачи. Она определяет полосу частот, пропускаемую световодом, и соответственно объем информации, который можно передавать по оптическому кабелю. Теоретически по волоконному световоду можно организовать огромное число каналов для передачи информации на большие расстояния. Однако имеются значительные ограничения, обусловленные тем, что сигнал на вход приемного устройства приходит тем более искаженным, чем длинее линия (рис. 2.20). Данное явление носит название дисперсии и обусловлено различием времени распространения различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления.

Дисперсия — это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса при прохождении по оптическому кабелю.

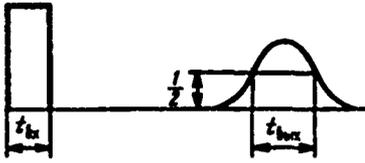


Рис. 2.20. Уширение импульсов за счет дисперсии

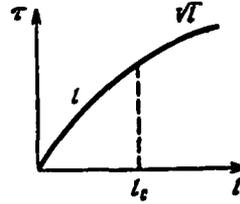


Рис. 2.21. Зависимость длины взаимодействия мод

Уширение импульса τ определяется как квадратичная разность длительности импульсов на выходе и входе кабеля по формуле

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}.$$

причем значения $t_{\text{вых}}$ и $t_{\text{вх}}$ берутся на уровне половины амплитуды импульсов. Связь между величиной уширения импульсов и полосой частот приблизительно выражается соотношением $\Delta F \approx 1/\tau$. Так, если $\tau = 20$ нс/км, то $\Delta F = 50$ МГц·км.

Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон использования световодов, но и существенно снижает дальность передачи по оптическому кабелю, так как чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса.

Пропускная способность оптического кабеля существенно зависит от типов волоконных световодов (одномодовые, многомодовые — ступенчатые, градиентные) и излучателей (лазер, светодиод).

Дисперсия возникает из-за некогерентности источников излучения и появления спектра, а также существования большого числа мод N . Дисперсия, возникающая из-за первой причины, называется *хроматической (частотной)* и делится на материальную и волноводную дисперсию.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны [$n = \psi_2(\lambda)$]. *Волноводная дисперсия* обусловлена процессами внутри моды и характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны [$\gamma = \psi_2(\lambda)$].

Дисперсия, возникающая из-за второй причины, называется *модовой дисперсией* и обусловлена наличием большого числа мод, время распространения которых различно [$t = \psi_2(N)$]. В геометрической интерпретации соответствующие модам лучи идут под разными углами, проходят различный путь в сердцевине волокна и, следовательно, поступают на вход приемника с различной задержкой.

Дисперсионные свойства тракта передачи зависят также от источника излучения. При лазерных источниках благодаря узкой полосе излучаемых частот дисперсия сказывается незначительно. В некогерентных передатчиках (светодиодах) полоса излучения существенно шире и дисперсия проявляется довольно значительно. Так, основной параметр, который характеризует уширение импульса ($\Delta\lambda/\lambda$), для лазеров составляет 0,001 нс/км, а для светодиодов — 0,1 нс/км, т. е. на два порядка больше.

Результирующее значение уширения импульсов за счет модовой $\tau_{\text{мод}}$, материальной $\tau_{\text{мат}}$ и волноводной $\tau_{\text{вв}}$ дисперсий определяется по формуле

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + (\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}})^2}.$$

С учетом реального соотношения вкладов отдельных видов дисперсии уширение импульсов для многомодовых волокон $\tau = \tau_{\text{мод}}$, а для одномодовых волокон $\tau = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{д.л.}}$.

Величина уширения импульса в многомодовых волокнах за счет модовой дисперсии, характеризуемая временем нарастания сигнала и определяемая как разность между самым большим и самым малым временем прихода в сечении световода на расстоянии l от начала может быть рассчитана по формулам

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n_1}{c} \sqrt{l l_c} \text{ — для ступенчатого световода.}$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} \sqrt{l l_c} \text{ — для градиентного световода.}$$

где n_1 — показатель преломления сердцевины; l — длина линии; c — скорость света; l_c — длина связи мод, при которой наступает установившийся режим (5...7 км для ступенчатого волокна и 10...15 км — для градиентного).

Соответственно пропускная способность градиентного световода в $2/\Delta$ раза выше, чем у ступенчатого, при одинаковом значении $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$. Учитывая, что, как правило, $\Delta \approx 1\%$, различие пропускной способности указанных световодов может достигать двух порядков.

При определении модовой дисперсии следует иметь в виду, что до определенной длины l_c межмодовой связи нет, а затем при $l > l_c$ происходит процесс взаимного преобразования мод и наступает установившийся режим. Поэтому, как видно из рис. 2.21, вначале при $l < l_c$ дисперсия увеличивается по линейному закону, а затем при $l > l_c$ — по квадратичному закону.

В табл. 2.17 приведены значения модовой дисперсии $\tau_{\text{мод}}$ в ступенчатом и градиентном волокнах при различных длинах линии l и различных соотношениях показателей преломления сердцевины и оболочки Δ .

Таблица 2.17

l, км	Значение $\tau_{\text{мод}}$, нс/км, для волокон			
	ступенчатых		градиентных	
	и Δ			
	0,01	0,006	0,01	0,006
10	498	332	2,47	1,09
20	718	474	3,55	1,58
30	868	578	4,32	1,91

Таблица 2.18

l, км	Значение ΔF , МГц, для волокон			
	ступенчатых		градиентных	
	и Δ			
	0,01	0,006	0,01	0,006
10	2,00	3,01	405	917
20	1,40	2,11	282	633
30	1,15	1,73	231	525

В табл. 2.18 приведены величины пропускной способности оптических волокон $\Delta F = 1/\tau$.

Приведенные данные подтверждают закономерность роста дисперсии и падения пропускной способности волокна с увеличением его длины. Градиентные волокна обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению со ступенчатыми.

Уширение импульсов τ при распространении по одномодовому волоконному световоду волны длиной λ с учетом источников излучения может быть определено по формулам:

$$\text{за счет материальной дисперсии } \tau_{\text{мат}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\lambda^2}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} l.$$

$$\text{за счет волноводной дисперсии } \tau_{\text{вв}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{2n_1^2 \Delta l}{c}.$$

где $\Delta\lambda/\lambda$ — относительная ширина спектра излучения источника. По данным формулам не всегда удается выполнить расчет, так как неизвестен закон изменения n от λ и λ . Поэтому для расчета $\tau_{\text{вв}}$ и $\tau_{\text{мат}}$ часто пользуются экспериментальными данными и упрощенными формулами:

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot B(\lambda),$$

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot M(\lambda),$$

где $\Delta\lambda$ — ширина спектральной линии источника излучения, равная 0,1... 4 нм для лазера и 15... 80 нм для светодиода; l — длина линии, км; $M(\lambda)$ и $B(\lambda)$ — удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно.

Удельные дисперсии выражаются в пикосекундах на километр длины световода и на метр ширины спектра. Величины $M(\lambda)$ и $B(\lambda)$ для кварцевого стекла приведены в табл. 2.19.

Таблица 2.19

λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,55	1,6	1,8
$B(\lambda)$, пс/(км·нм)	5	5	6	7	8	8	12	14	16
$M(\lambda)$, пс/(км·нм)	400	125	40	10	-5	-5	-18	-20	-25

Соответственно с увеличением длины волны $\tau_{\text{мат}}$ уменьшается и проходит через нуль, а $\tau_{\text{вв}}$ несколько растет. Причем вблизи $\lambda \approx 1,35$ мкм происходит их взаимная компенсация ($\tau_{\text{мат}} \approx -\tau_{\text{вв}}$) и результирующая дисперсия приближается к нулевому значению. Поэтому волна 1,3 мкм получает широкое применение в одномодовых системах передачи. Однако по затуханию предпочтительнее волна 1,55 мкм и для достижения минимума дисперсии в этом случае приходится варьировать профилем показателя преломления и диаметром сердцевины. При сложном профиле и трехслойном световоде можно и на волне 1,55 мкм получить минимум дисперсионных искажений.

В табл. 2.20 и на рис. 2.22 показан ход изменения волноводной, материальной и результирующей дисперсий в зависимости от длины волны. В диапазоне 1,3... 1,6 мкм волноводная и материальная дисперсии находятся в противофазе и взаимно компенсируют друг друга. Поэтому, как видно из рис. 2.23, в области $\lambda = 1,3 \dots 1,4$ мкм обеспечивается наибольшая пропускная способность световода.

Ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ существенно влияет на дисперсионные характеристики τ и полосу пропускания ΔF световода (рис. 2.24).

Рассмотренное выше явление дисперсии приводит как к ограничению пропускной способности оптических кабелей ΔF , так и к снижению дальности передачи по ним l (рис. 2.25).

Таблица 220

λ , мкм		0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,55	1,6	1,8
$l = 30$ км	$\tau_{зв}$, пс/(нм·км)	300	300	360	420	480	600	720	840	960
	$\tau_{мат}$, пс/(нм·км)	24000	7500	2400	600	-300	-900	-1080	-1200	-1500
	$\tau_{рез}$, пс/(нм·км)	24300	7800	2700	1020	180	-300	-360	-360	-540
	$\tau_{зв}$, пс/(нм·км)	500	500	600	700	800	1000	1200	1400	1800
$l = 50$ км	$\tau_{зв}$, пс/(нм·км)	40000	12500	4000	1000	-500	-1500	-1800	-2000	-2500
	$\tau_{мат}$, пс/(нм·км)	40500	13000	4600	1700	300	-500	-600	-600	-700
	$\tau_{рез}$, пс/(нм·км)									
	$\tau_{зв}$, пс/(нм·км)									

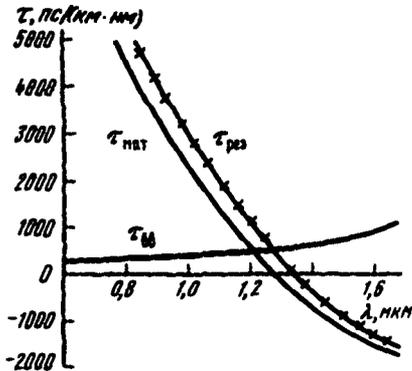


Рис. 2.22. Зависимости материальной, волновой и результирующей дисперсий от длины волны

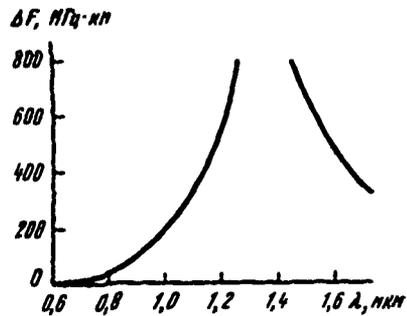


Рис. 2.23. Зависимость пропускной способности световода от длины волны

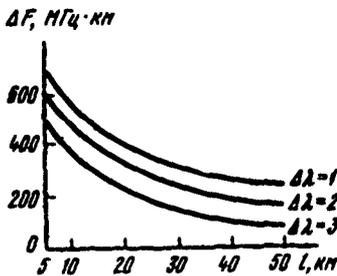


Рис. 2.24. Зависимость пропускной способности световода от длины линии

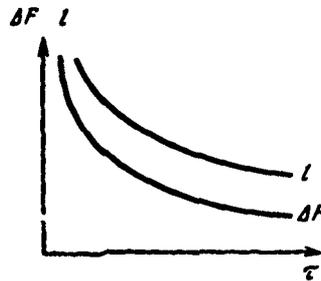


Рис. 2.25. Влияние дисперсии на характеристики световода $\Delta F, l$

Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими в этом плане являются одномодовые световоды. Из многомодовых световодов лучшие данные у градиентных. Наиболее резко дисперсия проявляется у ступенчатых световодов. Соответственно пропускная способность одномодовых световодов — тысячи, градиентных — сотни и ступенчатых — десятки мегагерц.

В табл. 2.21 приведены дисперсионные свойства различных типов волоконных световодов.

Из табл. 2.21 следует, что:

Таблица 2.21

Вид дисперсии	Причина дисперсии	Значение дисперсии, нс/км, для световодов		
		многомодовых		одномодовых
		ступенчатых	градиентных	
Волноводная	$\gamma = \varphi_1(\lambda)$	Малое значение	Малое значение	} Взаимная компенсация } Малые значения } Отсутствует
Материальная	$n = \varphi_2(\lambda)$	1...2	0,1...0,3	
Модовая	$t = \varphi_3(N)$	10...20	1...2	

в ступенчатых световодах при многомодовой передаче доминирует модовая дисперсия, которая достигает 10...20 нс/км;

в одномодовых ступенчатых световодах отсутствует модовая дисперсия и в целом дисперсия сказывается существенно меньше. Здесь проявляются волноводная и материальная дисперсии. Но при определенных длинах волн ($\lambda = 1,2 \dots 1,6$ мкм) происходит их взаимная компенсация ($\tau_{mat} \approx -\tau_{wv}$) и результирующая дисперсия не превышает нескольких пикосекунд;

в градиентных световодах происходит выравнивание времени распространения различных мод и определяющей является материальная дисперсия, которая уменьшается с увеличением длины волны. По абсолютной величине дисперсия колеблется в пределах 1...2 нс/км.

Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими обладают одномодовые световоды. Хорошие характе-

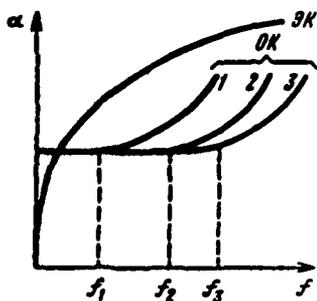


Рис. 2.26. Частотная зависимость затухания электрических и оптических кабелей

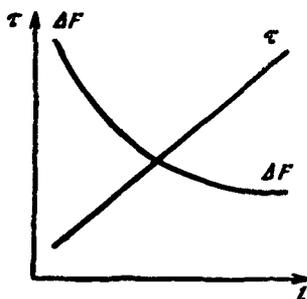


Рис. 2.27. Взаимосвязь дисперсии и пропускной способности от длины волны

ристики также у градиентных световодов с плавным параболическим законом изменения показателя преломления. Наиболее резко дисперсия проявляется у ступенчатых многомодовых световодов. Поэтому одномодовые волокна (f_3) обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению со ступенчатыми волокнами (f_1), а градиентные волокна (f_2) занимают промежуточное значение (рис. 2.26). Дисперсия в основном определяет ширину полосы передаваемых частот и соответственно число каналов передачи информации.

На рис. 2.27 показан характер зависимости дисперсии τ и пропускной способности ΔF оптических кабелей от длины линии l . Дисперсия приводит как к ограничению пропускной способности оптических кабелей, так и к снижению дальности передачи по ним. Соотношение между полосой частот и дальностью передачи выражается формулами:

$$\frac{\Delta F_x}{\Delta F} = \frac{l}{l_x}$$

— для коротких линий ($l < l_c$);

$$\frac{\Delta F_x}{\Delta F} = \sqrt{\frac{l^2}{l_x l_c}}$$

— для длинных линий ($l > l_c$), где значения с индексом x — искомые, а без индекса — заданные; l_c — длина линии при устанавливаемом режиме передачи (5...7 км для ступенчатого волокна и 10...15 км — для градиентного), длина связи мод.

В реальных условиях обычно нормируется полоса пропускания на один километр и определяется полоса пропускания на всю линию по формулам:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{l_x}$$

— для коротких линий ($l < l_c$);

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}}$$

— для $l > l_c$. Километрическое значение полосы пропускания определяется величиной дисперсии и выражается соотношением $\Delta F = 1/\tau$.

2.12. Пропускная способность и дальность связи

В электрических кабелях с медными проводниками (симметричных и коаксиальных) полоса пропускания и дальность связи в основном лимитируются затуханием и помехозащищенностью цепей. Оптические кабели принципиально не подвержены электромагнитным воздействиям и обладают высокой помехозащищенностью, поэтому параметр помехозащищенности не является ограничивающим фактором. В оптических кабелях полоса пропускания и дальность связи лимитируются затуханием и дисперсией.

При определении дальности связи по кабельным линиям необходимо учитывать специфику различных систем передачи. В аналоговых системах передач (АСП) происходит накопление помех по всей длине линии и нужно учитывать всю длину линии. В цифровых системах передачи (ЦСП) в каждом регенерационном пункте устраняются помехи и восстановленный сигнал передается дальше. Так что в ЦСП качество связи определяется соотношением сигнал/шум одного регенерационного участка.

Длину регенерационного участка ВОЛС при использовании ЦСП определяют следующим образом. Длину регенерационного участка выбирают по наименьшему значению l_α или $l_{\Delta F}$, но так, чтобы выполнялись требования по

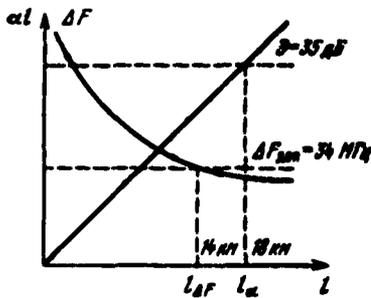


Рис. 2.28. К определению длины регенерационного участка оптического кабеля

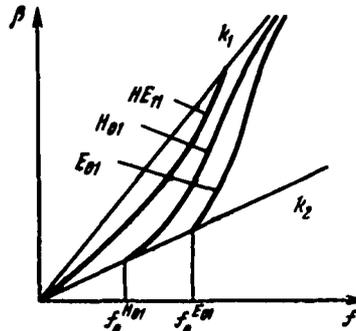


Рис. 2.29. Частотная зависимость коэффициента распространения

затуханию сигнала αl и пропускной способности ΔF . Как видно из рис. 2.28, с увеличением длины линии возрастает затухание цепи αl , которое не должно превышать энергетический потенциал системы \mathcal{E} , обычно составляющий 35...40 дБ. Одновременно с увеличением длины линии уменьшается пропускная способность световода ΔF , которая зависит от используемой системы передачи (например, для цифровых систем передачи ИКМ-480 $v=34$ Мбит/с). Из рис. 2.28 видно, что оптимальная длина участка по затуханию составляет 18 км, а по пропускной способности 14 км; принимаем длину регенерационного участка по наименьшему значению, в данном случае по пропускной способности $l_{\Delta F}=14$ км.

В общем виде ограничивающим фактором длины регенерационного участка может быть как дисперсия τ , так и затухание αl . Применительно к передаточным характеристикам существующих оптических кабелей в многомодовых световодах длина регенерационного участка и дальность связи лимитируются дисперсией и соответственно полосой пропускания, а в одномодовых световодах, обладающих хорошими дисперсионными характеристиками, длина участка и дальность связи определяются затуханием световодного тракта. Для систем цифровой передачи по многомодовым оптическим кабелям при $\lambda=0,85$ мкм длина регенерационного участка равна 10...30 км, а по одномодовым кабелям на длинах волн 1,3 или 1,55 мкм она достигает 50...100 км.

2.13. Коэффициент распространения, скорость передачи по световоду и волновое сопротивление

Коэффициент распространения β является важнейшим параметром, определяющим форму сигнала, качество и скорость передачи по линии. На основании ранее приведенных волновых уравнений и используя значения поперечных коэффициентов $g_1^2=k_1^2-\beta^2$ (для сердцевин) и $g_2^2=\beta^2-k_2^2$ (для оболочки), получаем следующее выражение для расчета β (рад/км):

$$\beta = \frac{\omega n_1}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \left(1 - \frac{n_2^4}{n_1^4}\right)},$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления сердцевин и оболочки; f — расчетная частота; $f_0 = \frac{p_{nm}c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$ — критическая частота; c — скорость света; d — диаметр сердцевин; p_{nm} — значения корней функций Бесселя для различных типов волн (см. табл. 2.6).

В предельных случаях при критической частоте f_0 и при больших расчетных частотах ($f \rightarrow \infty$)

$$\beta = \frac{\omega n_1}{c} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)} = \frac{\omega n_2}{c} = k_0 n_2 \quad \text{при } f \rightarrow f_0.$$

$$\beta = \frac{\omega n_1}{c} \sqrt{1 - 0} = \frac{\omega n_1}{c} k n_1 \quad \text{при } f \rightarrow \infty.$$

Из рис 229, где приведена частотная зависимость коэффициента распространения, видно, что β изменяется от значений k_2 в оболочке (при $f = f_0$) до значений k_1 в сердцевине (при $f \rightarrow \infty$), т.е. $k_2 < \beta < k_1$. Для каждого типа волны (моды) имеется своя критическая частота. Волна HE_{11} не имеет критической частоты.

Исходную формулу расчета β (рад/км) можно представить несколько в другом виде, используя значение критической частоты

$$\beta = \frac{\omega n_1}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{pnm}{\pi d f n_1}\right)^2}.$$

В табл. 222 приведены данные расчета β для волн HE_{12} и E_{01} в широком диапазоне частот

Таблица 222

HE_{12} $\frac{pnm}{\pi d} = 3,832$	$f \times 10^{13}$, Гц	$f_0 = 2,62$	$1,25f_0 =$ $= 3,28$	$1,5f_0 =$ $= 3,94$	$1,75f_0 =$ $= 4,59$	$2f_0 =$ $= 5,24$	$4f_0 =$ $= 10,49$
	$\beta \times 10^6$, $\frac{\text{рад}}{\text{км}}$	8,05	10,1	12,08	14,41	16,47	32,95
E_{01} $\frac{pnm}{\pi d} = 2,405$	$f \times 10^{13}$, Гц	$f_0 = 1,647$	$1,25f_0 =$ $= 2,06$	$1,5f_0 =$ $= 2,47$	$1,75f_0 =$ $= 2,88$	$2f_0 = 3,29$	$4f_0 =$ $= 6,59$
	$\beta \times 10^6$, $\frac{\text{рад}}{\text{км}}$	5,12	6,44	7,75	9,06	10,36	20,79

Фазовая скорость v — это скорость (км/с) перемещения вдоль линии фронта определенной волны, определяющаяся соотношением

$$v = \frac{c}{n_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)}}.$$

где f — расчетная частота, f_0 — критическая частота. В предельных случаях при f_0 и $f \rightarrow \infty$

$$v = \frac{c}{n_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)}} = \frac{c}{n_2} \quad \text{при } f = f_0.$$

$$v = \frac{c}{n_1} \frac{1}{\sqrt{1 - 0}} = \frac{c}{n_1} \quad \text{при } f \rightarrow \infty.$$

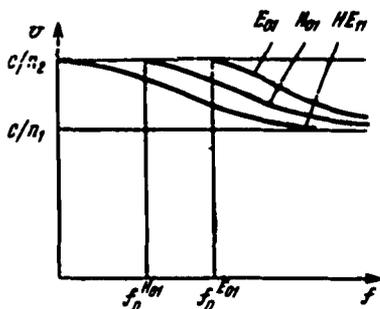


Рис. 2.30. Частотные зависимости скорости распространения

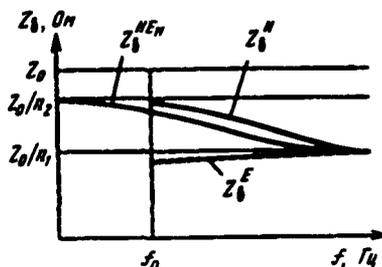


Рис. 2.31. Частотные зависимости волнового сопротивления

Фазовая скорость передачи по световоду (рис. 2.30) при критической частоте равна скорости распространения волны в оболочке (c/n_2), а с ростом частоты поле все больше концентрируется в сердцевине световода, происходит эффективная передача и скорость определяется свойствами сердцевины (c/n_1). Волна HE_{11} распространяется во всем диапазоне частот. Значения фазовой скорости находятся в пределах скоростей в оболочке и сердцевине: $c/n_1 < \beta < c/n_2$.

Используя значение критической частоты f_0 , можно несколько упростить формулу расчета фазовой скорости:

$$v = \frac{c}{n} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{nm} c}{\pi d f n_1}\right)^2}}$$

В табл. 2.23 приведены результаты расчета фазовой скорости для волны HE_{12} ($\rho_{nm} = 3,832$).

Таблица 2.23

$f \cdot 10^{13}$ Гц	$f_0 = 2,62$	$1,25f_0 = 3,28$	$1,5f_0 = 3,94$	$1,75f_0 = 4,59$	$2f_0 = 5,25$	$4f_0 = 10,4$
v , км/с	202 157	200 884	200 203	199 795	199 532	198 892

Волновое сопротивление Z_0 , Ом, определяется на основе ранее приведенных выражений для электрического E и магнитного H полей. Для электрических полей

$$Z_0^E = \frac{\beta}{\omega \epsilon_a} = \frac{Z_0}{n_1} \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)},$$

для магнитных полей

$$Z_0^H = \frac{\omega \mu_a}{\beta} = \frac{Z_0}{n_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^2}}.$$

В предельных случаях при f_0 и $f \rightarrow \infty$:
для электрических полей

$$Z_{\text{в}}^E = (Z_0/n_1) \frac{n_2}{n_1} \text{ при } f = f_0,$$

$$Z_{\text{в}}^E = Z_0/n_1 \text{ при } f \rightarrow \infty;$$

для магнитных полей

$$Z_{\text{в}}^H = Z_0/n_2 \text{ при } f = f_0.$$

$$Z_{\text{в}}^H = Z_0/n_1 \text{ при } f \rightarrow \infty.$$

В табл. 2 24 приведены расчетные данные значений волновых сопротивлений электрических и магнитных полей при различных частотах. Расчеты выполнены при $Z_0=376,7$ Ом и $Z_0/n_1=249,5$ Ом.

Таблица 2 24

f_0 , Гц	$Z_{\text{в}}^E$, Ом	$Z_{\text{в}}^H$, Ом	f_0 , Гц	$Z_{\text{в}}^E$, Ом	$Z_{\text{в}}^H$, Ом
$f_0=2,385 \times 10^{13}$	245,17	253,84	$1,75 f_0$	248,08	250,87
	246,73	252,24	$2 f_0$	248,40	250,54
	247,57	251,38	$4 f_0$	249,20	249,74

Из рис. 2 31, где показан ход кривых, видно, что с ростом частоты $Z_{\text{в}}^E$ несколько растет, а $Z_{\text{в}}^H$ падает. В обоих случаях в области высоких частот они становятся равными сопротивлению сердцевинки ($Z_0/n_1=249,5$ Ом).

Глава 3

Оптические волокна и кабели

3.1. Рекомендации МККТТ по характеристикам оптических волокон

Оптический кабель состоит из скрученных по винтовой линии оптических волокон (волоконных световодов), заключенных в общую защитную оболочку. При необходимости кабель может содержать силовые, армирующие элементы. Общий вид оптического кабеля приведен на рис. 3.1.

Основным элементом ОК является оптическое волокно, представляющее собой тонкую двухслойную нить из кварца (SiO_2) с пластмассовым покрытием (рис. 3 2).

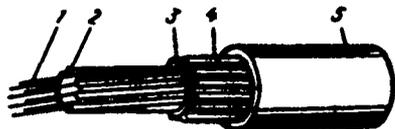


Рис. 3.1. Оптический кабель:

1 — волокно; 2 — профилирующий сердечник; 3 — полиэтиленовая лента; 4 — армирующие элементы (сталь, стекло, пластик); 5 — наружная защитная оболочка

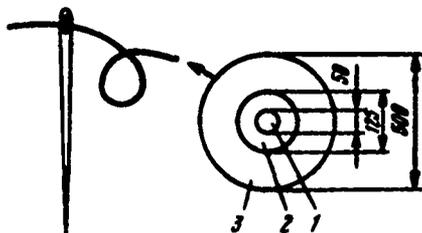


Рис. 3.2 Оптическое волокно:

1 — сердечник; 2 — оболочка; 3 — покрытие

Постановлением МККТТ регламентированы конструктивные и оптические характеристики световодов. В табл. 3.1 приведена классификация световодов по затуханию и полосе пропускания.

Таблица 3.1

λ , мкм	Категория качества	α , дБ/км	ΔF , МГц·км	λ , мкм	Категория качества	α , дБ/км	ΔF , МГц·км
0,85	1	4,0	200	1,3	1	3,0	200
	2	3,5	500		2	2,0	500
	3	3,0	800		3	1,5	800
	4	—	1000		4	1,0	1000
					5	0,8	1200

Для многомодовых световодов МККТТ рекомендует диаметр сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм; соотношение диаметров $125/50=2,5$; числовую апертуру $NA=0,18...0,24$; отклонение диаметра световода от номинала $\pm 2,4\%$, сердцевины $\pm 6\%$; неконцентричность сердцевины и оболочки 6%.

Для градиентных световодов МККТТ рекомендует профиль показателя преломления, близкий к параболическому.

Для одномодовых световодов обычно принимают диаметр сердцевины 8-10 мкм, оболочки 125 мкм и отклонение диаметра от номинала $\pm 2,4\%$.

3.2. Классификация оптических волокон

В соответствии с ГОСТ 267931—85 «Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Система условных обозначений» оптические волокна подразделяют по следующим признакам: на группы — по типу распространяющегося излучения; на подгруппы — по типу профиля показателя преломления; на виды — по материалу сердцевины и оболочки.

Существуют следующие группы оптических волокон: многомодовое (М), одномодовое без сохранения поляризации излучения (Е) и одномодовое с сохранением поляризации излучения (П).

Группа многомодовых ОВ подразделяется на две подгруппы: со ступенчатым (С) и градиентным (Г) профилем показателя преломления.

В конструктивном отношении одномодовые и многомодовые ОВ отличаются диаметром сердцевины. У первых диаметр сердцевины соизмерим с длиной волны ($d \approx \lambda$) и по нему передается лишь один тип волны (одна мода), а у вторых диаметр сердцевины существенно больше длины волны ($d > \lambda$) и по нему распространяется большое число волн.

Существуют следующие виды ОВ: кварцевая сердцевина и кварцевая оптическая оболочка; кварцевая сердцевина и полимерная оптическая оболочка; сердцевина и оптическая оболочка из многокомпонентного стекла; сердцевина и оптическая оболочка из полимерного материала.

Серцевина служит для передачи энергии. Основное назначение оболочки — в создании лучших условий отражения на границе сердцевина—оболочка и защиты от излучения энергии в окружающее пространство. Снаружи ОВ имеется покрытие из эпоксиакрилата, кремнийорганического или полимерного соединения. Таким образом, ОВ имеет трехслойную конструкцию: сердцевина, оболочка, покрытие (см. рис. 3.2).

3.3. Многомодовые оптические волокна

Многомодовые ОВ могут быть ступенчатыми или градиентными. У ступенчатого ОВ профиль показателя преломления (ППП) постоянен и существует резкий переход от n_1 сердцевинки к n_2 оболочке. Градиентное ОВ имеет сердцевину с непрерывным плавным изменением ППП по радиусу от центра к периферии с максимумом на оси волокна. Оптимальным ППП в ОВ является параболический

Изменение ППП по радиусу сердцевинки определяется выражением

$$n_r = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

где r — текущий радиус; a — радиус сердцевинки; n_0 — показатель преломления в центре сердцевинки; (примерно 1,5);

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,003 - 0,01.$$

Поперечные размеры многомодового волокна: диаметр сердцевинки 50 мкм, оболочки 125 мкм, покрытия 500 мкм. В многомодовом ОВ распространяется несколько мод (типов воли).

3.4. Одномодовые оптические волокна

Одномодовые ОВ предназначены для передачи одного типа воли — одной моды. Как правило, они имеют кварцевую сердцевину (диаметр 8...10 мкм) и оболочку (диаметр 125 мкм).

Для согласования условий минимальных потерь и нулевой дисперсии ООВ в зависимости от профиля показателя преломления имеют несколько модификаций.

В ООВ дисперсия состоит из волноводной и материальной дисперсий ($\tau = \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{мат}}$), которые, как правило, имеют противоположные знаки. Волноводная дисперсия зависит от ППП. Изменяя его, можно на определенной длине волны подобрать значение $\tau_{\text{вв}}$, равное по величине и обратное по знаку $\tau_{\text{мат}}$. В результате суммарная дисперсия будет равна нулю.

На рис. 3.3 приведены значения дисперсий при обычном ступенчатом и модифицированном треугольном ППП. Из рисунка видно, что если в первом случае результирующая дисперсия имеет большое значение, то во втором происходит компенсация материальной и волноводной дисперсией и в диапазоне $\lambda = 1,3 \dots 1,6$ мкм результирующая дисперсия весьма мала. Поэтому обеспечивается большая пропускная способность оптического тракта ($\Delta F = 1/\tau$).

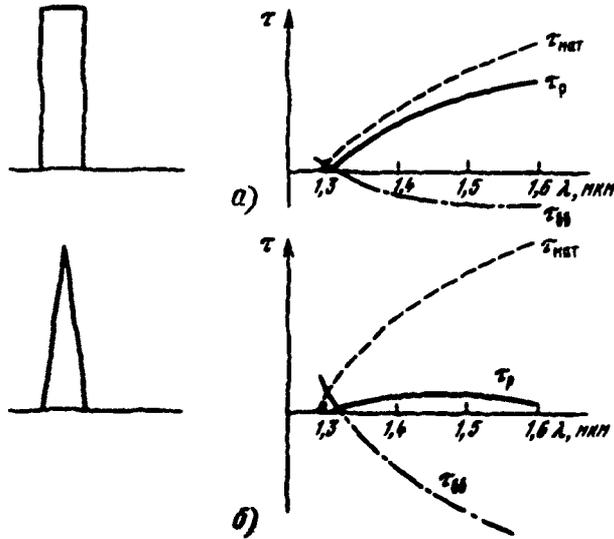


Рис. 3.3. Дисперсия одномодовых волокон при ступенчатом (а) и модифицированном треугольном (б) профиле показателя преломления

Известны ООВ со смещенной и сглаженной дисперсией. Различные конфигурации профиля показателя преломления ООВ со смещенной дисперсией показаны на рис. 3.4. Свойства их приведены в табл. 3.2. Получили применение ООВ с треугольным, трапециевидальным, двуступенчатым и другими профилями. Хорошие результаты дает треугольный профиль, при котором достигаются минимум потерь и нулевая дисперсия при $\lambda = 1,55$ мкм. Треугольный профиль обладает самофокусирующими свойствами и удерживает распространяющиеся лучи в небольшом объеме. Так как волноводная дисперсия становится больше с уменьшением модового пятна, то для треугольного профиля можно иметь больший диаметр сердцевинны ($d = 15 \dots 20$ мкм), чем для волокна со ступенчатым распределением показателя преломления при равном значении дисперсии. Это позволяет сдвинуть нулевое значение дисперсии к длине волны 1,55 мкм. Для треугольного профиля оптимальным является соотношение $0,8\% + \Delta n < 1,0\%$, где $\Delta n = n_1 - n_2$. Собственные потери в ООВ могут быть уменьшены за счет уменьшения концентрации легирующей добавки германия и применения фтора для уменьшения n_2 при сохранении Δn постоянной.

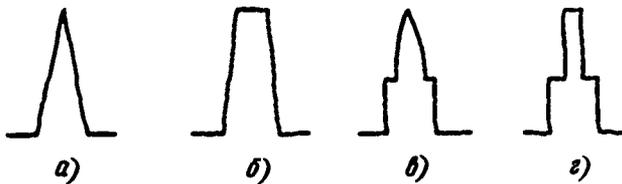


Рис. 3.4. Профили показателя преломления ООВ со смещенной дисперсией: а — треугольный; б — трапециевидальный; в — выпуклый; г — двуступенчатый

Таблица 32

Параметр	Значение профиля показателя преломления			
	рис. 3.5, а	рис. 3.5, б	рис. 3.5, в	рис. 3.5, г
Дисперсия, пс/(нм·км)	—	—	0,3	3
Наклон дисперсии при $\lambda=1,55$ мкм, пс/(нм ² ·км)	—	—	0,052	0,09
Длина волны нулевой дисперсии, λ_0 , мкм	$1,56 \pm 0,01$	1,56	$1,544 \pm 0,022$	1,52
Коэффициент затухания, дБ/км, при $\lambda=1,55$ мкм	0,21	0,33	0,24	0,21

Таблица 33

Параметр	Значение профиля показателя преломления			
	рис. 3.6, а	рис. 3.6, б	рис. 3.6, в	рис. 3.6, г
Дисперсия при $\lambda=1,33$ мкм, пс/(нм·км)	-8	0	-3	-6
Наклон дисперсии, пс/(нм ² ·км)	0,06	—	0,03	0,06
Дисперсия при $\lambda=1,55$ мкм, пс/(нм·км)	+0,5	1	0,08	-0,5
Наклон дисперсии, пс/(нм ² ·км)	-0,01	—	-0,02	0
Длина волны, мкм, для дисперсии:				
3 пс/(нм·км)	2,4 ... 1,7	1,25 ... 1,7	1,30 ... 1,65	1,37 ... 1,60
5 пс/(нм·км)	1,45 ... 1,7	1,3 ... 1,65	1,38 ... 1,60	1,40 ... 1,60
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 , мкм	1,50/1,67	1,3/1,6	1,47/1,51	—
Коэффициент затухания, дБ/км, при $\lambda=1, 3 \dots 1,55$ мкм	0,6/0,4	0,6/0,4	0,7/0,4	0,35/0,20

Одномодовые ОВ со сглаженной (выравненной) дисперсией (рис. 3.5 и табл. 33) изготавливают путем создания депрессированного кольца в опти-

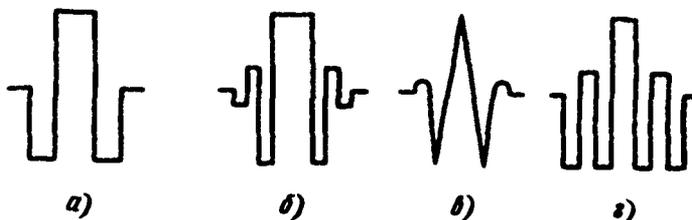


Рис. 3.5. Профили показателя преломления ОВ со сглаженной дисперсией: а — типа W; б — квадрупольный; в — треугольный; г — усложненный

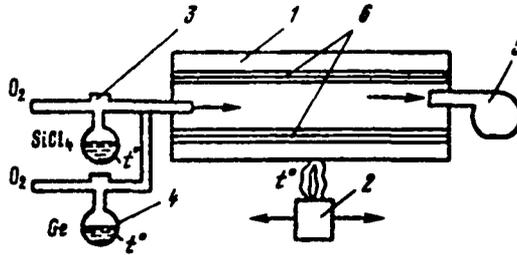


Рис. 3.6. Химическое осаждение из газовой фазы:
 1 — опорная трубка; 2 — нагревательный элемент; 3 — хлорированный кварц; 4 — германий; 5 — откачка газа; 6 — осаждаемые слои

ческой оболочке вокруг сердцевинки. Этот тип ООВ теперь известен как ОВ типа W или одномодовые ОВ с двойной оптической оболочкой. Его дисперсия вблизи 1,3 мкм приблизительно соответствует дисперсии обычного одномодового ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления. Однако с увеличением длины волны распространяющийся свет проникает в депрессированное кольцо профиля вокруг сердцевинки, что приводит к прогрессирующему увеличению волноводной дисперсии в длинноволновой области. Это может компенсировать материальную дисперсию в широком интервале длин волн. Другими разновидностями ОВ со сглаженной дисперсией является ООВ с квадрупольной, квадрупольной оптической оболочкой и треугольной сердцевинкой, тройными оптическими оболочками и другими профилями (рис. 3.6).

3.5. Изготовление оптических волокон

Технология изготовления оптического кабеля (скрутка, наложение оболочек и защитных покровов и др.) в принципе аналогична изготовлению обычных электрических кабелей. Отличие заключается лишь в создании волокна с малыми потерями.

В качестве исходного материала для изготовления ОВ используют кварцевое стекло (SiO_2), которое является хорошей средой для распространения световой энергии. Однако, как правило, стекло содержит большое количество таких посторонних примесей, как металлы (железо, кобальт, никель, медь) и гидроксильные группы (ОН). Эти примеси приводят к существенному увеличению потерь за счет поглощения и рассеяния света. Для получения ОВ с малыми потерями и затуханием необходимо избавиться от примесей и получить химически чистое стекло.

В настоящее время наибольшее применение получили два способа создания оптических волокон с малыми потерями: метод химического осаждения из газовой фазы и метод двойного тигля.

Получение ОВ путем химического осаждения из газовой фазы выполняется в два этапа: сначала изготавливают двухслойную кварцевую заготовку, а затем из нее вытягивают волокно. Заготовку изготавливают следующим образом (рис. 3.6). Внутри полой опорной трубки из кварца с показателем преломления n_2 длиной 0,5...2 м и диаметром 16...18 мм подают струю хлорированного кварца (SiCl_4) и кислорода (O_2). В результате химической реакции при высокой температуре (1500...1700°С) на внутренней поверхности трубки слоями осаждается чистый кварц (SiO_2). Таким образом заполняется внутренняя полость трубки и в центре образуется воздушный канал. Чтобы его ликвидировать, подается еще более высокая температура (1900°С), в результате чего происходит схлопывание и трубчатая

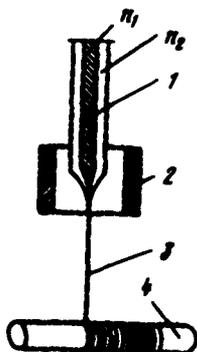


Рис. 37 Получение из заготовки оптического волокна

1 — заготовка; 2 — теплоноситель, 3 — волокно, 4 — приемный барабан

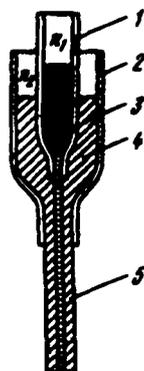


Рис. 38 Изготовление волокна методом двойного тигля:

1, 2 — внутренний и внешний сосуды; 3, 4 — кварцевое стекло сердцевинки и оболочки, 5 — оптическое волокно

заготовка превращается в сплошную цилиндрическую заготовку. При этом чистый осажденный кварц служит сердцевинной оптического волокна с показателем преломления n_1 , а сама трубка выполняет роль оболочки с показателем преломления n_2 . Затем при температуре размягчения стекла (1800–2200°С) производят вытяжку волокна из заготовки, наложение первичного покрытия (эпоксинакрилат, кремнеорганика и др.) и намотку волокна на приемный барабан. Из заготовки длиной 1 м получается свыше 1 км оптического волокна (рис. 37).

Достоинством данного способа является не только получение оптического волокна с сердечником из химически чистого кварца, но также и возможность создания градиентных волокон с заданным профилем показателя преломления. Это осуществляется за счет применения легированного кварца с присадкой титана, германия, бора, фосфора или других реагентов. В зависимости от применяемой присадки показатель преломления может изменяться (например, германий увеличивает, а бор уменьшает показатель преломления). Подбирая рецептуру легированного кварца и соблюдая определенный объем присадки, можно за счет осаждаемых на внутренней поверхности трубки слоев обеспечить требуемый характер изменения профиля показателя преломления по сечению сердечника волокна.

Изготовление заготовки и оптического волокна методом *двойного тигля* исключает предварительный этап, и волокно получают путем непрерывного вытягивания из расплава, содержащегося в платиновом сосуде, через фильер в дне сосуда. Для получения двухслойного волокна используют два плавильных сосуда так, чтобы один окружал другой, как показано на рис. 38. Во внутренний сосуд помещают расплавленное кварцевое стекло с показателем преломления n_1 , из которого образуется сердечник волокна, а во внешний — стекло с показателем n_2 для оболочки. Стекло оболочки, вытекающее из фильеры внешнего сосуда, тянется вместе со стеклом сердечника, вытекающим из фильеры внутреннего сосуда, образуя таким образом двухслойное стекло, которое наматывают на приемный барабан.

Сравнивая приведенные способы получения оптического волокна, можно отметить, что первый обеспечивает лучшее качество сердечника волокна и позволяет получать градиентное волокно. Достоинством второго способа являются простота технологии и непрерывность процесса изготовления волокна.

3.6. Классификация оптических кабелей связи

Оптический кабель состоит из скрученных по определенной системе оптических волокон (световодов), заключенных в общую защитную оболочку. При необходимости кабель может содержать силовые (упрочняющие) и демпфирующие элементы.

Существующие оптические кабели по своему назначению могут быть классифицированы на пять групп: магистральные, зоновые, городские, сельские, объектовые и подводные. В отдельную группу выделяются станционные оптические кабели.

Магистральные кабели предназначены для передачи информации на большие расстояния и на большое число каналов. Они обладают малыми затуханием и дисперсией и большой информационно-пропускной способностью.

Зоновые кабели предназначены для связи областного центра с районами и городами области. Дальность связи, как правило, составляет порядка сотни километров.

Городские кабели применяют в качестве соединительных между городскими АТС и узлами связи. Они рассчитаны на короткие расстояния (5... 10 км) и большое число каналов. Эти линии, как правило, работают без промежуточных линейных регенераторов.

Сельские кабели предназначены для организации сельской телефонной связи, имеют преимущественно четырехволоконную конструкцию и прокладываются в грунт или подвешиваются по опорам.

Объектовые кабели служат для передачи информации внутри объекта. Сюда относятся учрежденческая и видеотелефонная связь, внутренняя сеть кабельного телевидения, а также бортовые информационные системы подвижных объектов (самолет, корабль и др.).

Подводные кабели предназначены для осуществления связи через большие водные преграды. Применяемые для этой цели оптические кабели должны обладать высокой механической прочностью на разрыв и иметь надежные влагостойкие покрытия. Для подводной связи также важно иметь малое затухание и большие длины регенерационных участков.

Станционные кабели предназначены для межстоечных и блочных соединений и монтажа аппаратуры. Они выполняются чаще всего в виде жгутов или плоских лент.

3.7. Типы и конструкции оптических кабелей связи

Современные оптические кабели связи классифицируются по следующим признакам: назначению, области применения системы передачи, конструкции сердечника, типу защитных оболочек и условиям прокладки (рис. 3.9).

В настоящее время в различных странах разрабатывается и изготавливается большое число разных типов оптических кабелей. Однако, несмотря на многообразие существующих типов кабелей, их можно подразделить на четыре группы (рис. 3.10): кабели концентрической повивной скрутки, кабели с профилированным сердечником, плоские кабели ленточного типа и кабели пучковой скрутки.

Кабели первой группы имеют традиционную повивную скрутку сердечника по аналогии с электрическими кабелями. Каждый последующий повив сердечника по сравнению с предыдущим имеет на шесть волокон больше. Известные кабели содержат преимущественно 4, 6, 8, 14 и 20 волокон. Обычно волокно свободно располагается в пластмассовой трубке, образуя модуль.

Кабели второй группы имеют в центре профилированный пластмассовый сердечник с пазами, в которых размещаются оптические волокна. Пазы, а

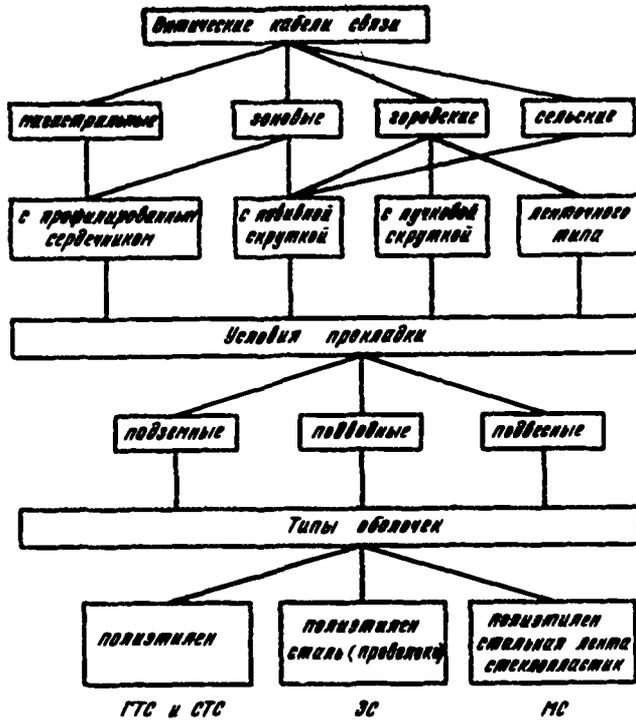


Рис. 39. Классификация оптических кабелей связи



Рис. 3.10. Типовые конструкции оптических кабелей:

а — повивной скрутки; б — с профилированным сердечником; в — летачного типа; г — пучковой скрутки; 1 — оптическое волокно; 2 — силовой элемент; 3 — внутренняя оболочка; 4 — внешняя полиэтиленовая оболочка; 5 — профилированный сердечник; 6 — лента с волокнами

соответственно и волокна располагаются по геликоиде, поэтому последние не испытывают продольного воздействия на разрыв. Такие кабели могут содержать 4, 6, 8 и 10 волокон.

Кабель ленточного типа состоит из стопки плоских пластмассовых лент, в которые вмонтировано определенное число оптических волокон. Чаще всего в ленте располагается 12 волокон, а число лент составляет 6, 8, 12; при 12 лентах такой кабель может содержать 144 волокна.

Кабель пучковой скрутки содержит определенное количество пучков. Каждый пучок может состоять из 4, 7, 10 волокон. Такие кабели изготавливаются на большое число волокон (50, 100 и больше).

Наибольшее распространение получили кабели первой и второй групп, изготавливаемые в нашей стране и странах Западной Европы. В США широко применяют кабели ленточного типа.

В настоящее время известны две конструктивные разновидности ОК: 1) кабели, содержащие металлические элементы (проводники, оболочки из свинца или алюминия, бронепокровы); 2) кабели полностью диэлектрические (без металла). К достоинству первых относятся высокая механическая прочность и влагостойкость. По медным проводникам можно осуществлять служебную связь, использовать их для дистанционного электропитания линейных регенераторов и находить трассу прокладки кабеля. Но такие кабели уязвимы в отношении электромагнитных воздействий (грозы и др.) и имеют большие габариты и массу.

Диэлектрические кабели свободны от электромагнитных воздействий, но менее прочны механически, менее влагостойки и подвержены агрессии со стороны грызунов. Первое поколение отечественных ОК, созданных в 1986—1988 гг., включает кабели городской связи (ОК-50), зоновой (ОЗКГ) и магистральной (ОМЗКГ) связей.

Современные требования развития связи потребовали создания новых усовершенствованных типов ОК, которые вошли во второе поколение. Такими кабелями, разработанными в 1990—1992 гг., являются: ОКК для городской связи (прокладка в канализации), ОКЗ — для зоновой и ОКЛ для линейной магистральной связи.

Отличительные особенности ОК второго поколения: переход на волны 1,3 и 1,55 мкм; применение одномодовых волокон; модульные конструкции кабелей (каждый модуль на 1, 2, 4 волокна); наличие медных жил для дистанционного электропитания; разнообразие типов наружных оболочек (стальные ленты, проволоки, стеклопластики, полиэтилен, оплетка).

3.8. Оптические кабели городской связи ОК-50

Типовая конструкция отечественного оптического кабеля ГТС ОК-50 приведена на рис. 3.11. Кабель с повивной скруткой сердечника имеет в центре упрочняющий силовой элемент из нитей СВМ (синтетической высокомолекулярной пластмассы). Волокна расположены в пластмассовых трубках, а снаружи — лавсановая лента и пластмассовая оболочка. Для влагостойкости сердечник кабеля в процессе изготовления заполняется гидрофобной (лагоотталкивающей) массой. Кабель предназначен для прокладки в телефонной канализации и поэтому не имеет наружных армирующих покровов.

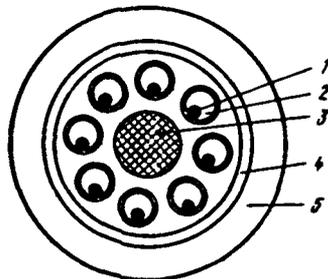


Рис. 3.11. Оптический кабель городской связи типа ОК-50:

1 — волокно; 2 — полиэтиленовая трубка; 3 — силовой элемент; 4 и 5 — соответственно внутренняя и внешняя полиэтиленовые оболочки

Маркировка кабеля: ОК — оптический кабель; 50 — диаметр сердцевины, мкм; 1 и 2 — первая или вторая разработка; 3 и 5 — коэффициент затухания, дБ/км; 4 и 8 — число волокон В нашей стране применяются следующие марки и конструкции кабелей ГТС:

- ОК-50-2-5-4 . . . Кабель линейный из четырех оптических волокон с диаметром сердцевины 50 мкм, разработки 2, с гидрофобным наполнением, центральным силовым элементом, вокруг которого скручены оптические волокна в полимерном покрытии, каждое из которых защищено фторопластовой трубкой, с наружной оболочкой из полиэтилена и затуханием до 5 дБ/км
- ОК-50-2-5-8 . . . То же, с затуханием до 5 дБ/км и восемью оптическими волокнами
- ОК-50-2-3-4 . . . То же, с затуханием до 3 дБ/км и четырьмя оптическими волокнами
- ОК-50-2-3-8 . . . То же, с затуханием до 3 дБ/км и восемью оптическими волокнами
- ОН-50-1-5-1 . . . Кабель стационарный с одним оптическим волокном, диаметром сердцевины 50 мкм, разработки 1, с полимерным покрытием, защитной фторопластовой трубкой, наружной оболочкой из поливинилхлорида и затуханием до 5 дБ/км
- ОН-50-1-5-2 . . . То же, с затуханием до 5 дБ/км и двумя оптическими волокнами
- ОН-50-1-3-1 . . . То же, с затуханием до 3 дБ/км и одним оптическим волокном
- ОН-50-1-3-2 . . . То же, с затуханием до 3 дБ/км и двумя оптическими волокнами

Строительная длина линейного кабеля не менее 1000 м, а стационарного не менее 100 м. Масса 1 км линейного и стационарного кабелей приведена в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Тип кабеля	Масса 1 км кабеля, кг	
	максимальная	номинальная
Линейный:		
4-волоконный	155	135
8-волоконный	150	130
Стационарный	25	23

Линейный кабель содержит четыре или восемь оптических волокон, а стационарный — одно или два оптических волокна. Центральный элемент состоит из упрочняющих нитей, помещенных в поливинилхлоридную оболочку. Каждое оптическое волокно в линейном кабеле заключено во фторопластовую трубку. Сочетание оптического волокна и фторопластовой трубки именуется модулем. Модули наружным диаметром $2,5 \pm 0,2$ мм скручивают (в четырехволоконном, чередуя с корделями заполнения) вокруг центрального силового элемента. Скрутку закрепляют лентами или нитями, а поверх

них накладывают оболочку из полиэтилена номинальной толщиной 1,7 .0,2 мм Наружный диаметр кабеля составляет $13,0 \pm 1,0$ мм Два соседних модуля в восьмиволоконном или два соседних корделя заполнения в четырехволоконном кабеле отличаются по цвету друг от друга и от остальных элементов в пивие

Одно или два оптических волокна в станционном кабеле укладывают во фторопластовую трубку наружным диаметром $2,5 \pm 0,2$ мм, а поверх — поливинилхлоридную оболочку наружным диаметром $4,5 \pm 0,3$ мм.

Геометрические размеры оптического волокна следующие.

диаметр оболочки оптического волокна 125 ± 3 мкм,

сердцевина оптического волокна 50 ± 3 мкм,

некруглость сердцевины оптического волокна менее 6%

некруглость оболочки оптического волокна менее 2,4%

Межмодульное пространство сердечника заполняется гидрофобной массой

Оптические характеристики

коэффициент затухания кабелей на длине волны 0,85 мкм не более 3 дБ/км для марок ОН-50-1 3-1, ОН 50 1-3 2, ОК 50-2-3 4, ОК-50 2-3 8, не более 5 дБ/км — для марок ОН-50-1-5-1, ОН-50-1-5-2, ОК 50 2-5-4, ОК-50-2-5-8, переходное затухание на ближнем и дальнем концах линейного кабеля не менее 60 дБ/км на длине 500 м,

полоса пропускания на длине 1 км не менее 250 МГц для кабелей с затуханием до 5 дБ/км и не менее 500 МГц для кабелей с затуханием до 3 дБ/км,

числовая апертура оптических волокон $0,2 \pm 0,002$.

Механические параметры

кабели должны выдерживать 20 изгибов на угол $\pm 80^\circ$ на цилиндре радиусом не более 250 мм для линейного кабеля и 90 мм для станционного кабеля;

растягивающее усилие кабелей для линейного кабеля не менее 1200 Н и для станционного не менее 50 Н;

раздавливающее усилие на длине 1 см, не менее, для линейного кабеля 1000 Н и для станционного 50 Н,

линейный кабель должен выдерживать 10 перемоток с барабана на барабан с диаметром шейки 500 мм и 10 циклов осевых закручиваний на угол 360° на длине $2 \pm 0,1$ м Линейный кабель должен быть устойчив к воздействию вибрационных нагрузок в диапазоне частот 1,80 Гц

Линейные кабели должны быть устойчивы к воздействию температуры от -40 до $+55^\circ\text{C}$, а станционные от -10 до $+55^\circ\text{C}$

Минимальная наработка на отказ должна быть не менее 200 000 ч

Срок хранения и службы кабеля 25 лет, из них в полевых условиях не менее 10 лет при защите кабелей от воздействия солнечной радиации

3.9. Оптические кабели городской связи ОКК

Оптические кабели марки ОКК, предназначенные для использования на волне 1,3 мкм, прокладывают как в канализации, так и в грунте и эксплуатируют при температуре -40 $+50^\circ\text{C}$

Шестнадцативолоконный оптический кабель с защитным покровом из стеклопластиковых стержней приведен на рис 3 12

Оптические кабели ОКК изготавливаются в двух вариантах

на основе градиентного оптического волокна с диаметром сердцевины 50 мкм (модификация 01), затуханием 0,7 дБ/км и при восьми оптических волокнах маркируются ОКК-50-0,1-0,7-8,

на основе одномодового оптического волокна с диаметром модового пятна 10 мкм (модификация 02), затуханием 1,0 дБ/км и при четырех оптических волокнах маркируются ОКК-10-02-1,0-4.

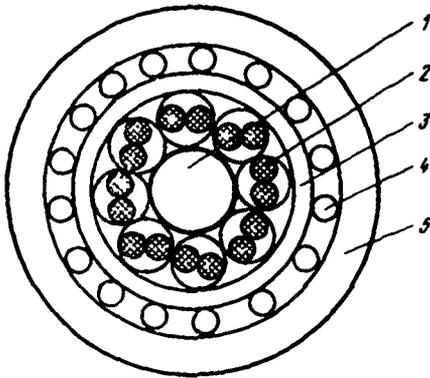


Рис 3 12 Оптический кабель городской связи марки ОККС:

- 1 — силовой элемент (стеклопластик);
- 2 — волокно, 3 — пластмассовая лента;
- 4 — стеклопластиковые стержни, 5 — полиэтиленовая оболочка

Маркировка
 ОКК — оптический кабель для прокладки в канализации
 ОККО — то же, с броней в виде металлической оплетки; ОККС — то же, с броней из стеклопластиковых стержней; ОККАК — то же в алюминиевой оболочке и с броней из круглых стальных проволок, ОКС — стационарный кабель;

10 или 50 — диаметр сердцевины; 01 или 02 — диаметр центрального элемента из стеклопластика или стали; 07 или 1 — коэффициент затухания, дБ/км; 4, 8, 16 — число волокон.

Марки, назначение, основные элементы конструкции и преимущественная область применения кабелей приведены в табл 3 5

Таблица 3 5

Марка кабеля	Назначение и основные элементы конструкции	Преимущественная область применения
ОКК-50-01	Кабель городской, с сердечником из градиентного оптического волокна, центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, оптическими модулями, скрученными вокруг стержня, и гидрофобным наполнителем, поверх которого наложена полиэтиленовая оболочка	Для прокладки в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах и в шахтах
ОКК-10-01	То же, но с одномодовым ОВ	То же
ОКК-50-02	То же, но с градиентным ОВ и стальным тросом в центре	То же
ОКК-10-02	То же, но с одномодовым ОВ	То же
ОККО-50-01	Кабель городской, в котором поверх сердечника наложены ПЭ промежуточная оболочка, металлическая оплетка и ПЭ защитная оболочка	Для прокладки в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах и в шахтах, с защитой от грызунов
ОККС-50 01	То же, но вместо металлической оплетки применяются стеклопластиковые стержни	То же
ОККС-10-01	То же, но с одномодовым ОВ	То же
ОККАК-50-01	Кабель городской, в котором поверх сердечника наложены ПЭ промежуточная оболочка, алюминиевая сварная оболочка, оболочка из ПЭ, броня из стальных проволок и ПЭ защитная оболочка	Для прокладки через судоходные реки и болота глубиной более 2 м и в мерзлотных грунтах

Марка кабеля	Назначение и основные элементы конструкции	Преимущественная область применения
ОККАК-10-01 ОКС-50-01	То же, но с одномодовым ОВ Кабель стационарный, в котором поверх сердечника наложена поливинилхлоридная защитная оболочка	То же Для прокладки внутри станций и в НРП
ОКС-10-01	То же, но с одномодовым ОВ	То же

Количество оптических волокон, коэффициент затухания на длине волны 1,3 мкм, расчетная масса и наружный диаметр кабеля для градиентного оптического волокна с коэффициентом широкополосности 1000 МГц×Х км и для одномодового оптического волокна с дисперсией 3,5 пс/(нм·км) приведены соответственно в табл 36 и 37.

Таблица 36

Марка	Число ОВ	Коэффициент затухания, дБ/км, не более	Наружный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км кабеля, кг
ОКК-50-01-0,7	4,8,16	0,7	10,8±1,0	87,3
ОКК-50-01-1,0	4,8,16	1,0	10,8±1,0	87,3
ОКК-50-02-0,7	4,8,16	0,7	12,1±1,0	109,3
ОКК-50-02-1,0	4,8,16	1,0	12,1±1,0	109,3
ОККО-50-01-0,7	4,8,16	0,7	15,3±1,0	233,0
ОККО-50-01-1,0	4,8,16	1,0	15,3±1,0	233,0
ОККО-50-02-0,7	4,8,16	0,7	15,3±1,0	246,0
ОККО-50-02-1,0	4,8,16	1,0	15,3±1,0	246,0
ОККС-50-01-0,7	4,8,16	0,7	18,2±1,0	320,7
ОККС-50-01-1,0	4,8,16	1,0	18,2 ^{+1,0} _{-2,0}	320,7
ОККАК-50-01-0,7	4,8	0,7	24,3 ^{+2,0} _{-1,0}	1190,0
ОККАК-50-01-1,0	4,8	1,0	24,3 ^{+2,0} _{-1,0}	1190,0
ОКС-50-01-1,0	4,6	1,0	9,5±0,8	92,6
ОКС-50-02-1,0	1	1,0	5,0±0,8	28,0
ОКС-50-03-1,0	1	1,0	5,0±0,8	30,0
ОКС-50-04-1,0	1	1,0	3,5±0,5	7,6

Строительная длина городских кабелей не менее 2000 м, а стационарно не менее 300 м.

Одномодовое ОВ имеет следующие геометрические размеры: диаметр модового поля 10±1 мкм, диаметр отражающей оболочки 125±3 мкм, некоцентричность сердцевин и оболочки не более 1,0 мкм.

Градиентное ОВ имеет следующие геометрические размеры: диаметр отражающей оболочки 125±3 мкм, диаметр сердцевин 50±3 мкм, некруглость сердцевин и оболочки — в пределах допусков на диаметр, некоцентричность сердцевин и оболочки не более 3 мкм.

Таблица 37

Марка кабеля	Число ОВ	Коэффициент затухания, дБ/км, не более	Наружный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км кабеля, кг
ОКК-10-01-1,0	4,8,16	1,0	10,8±1,0	87,3
ОКК-10-02-1,0	4,8,16	1,0	12,1±1,2	109,3
ОККО-10-01-1,0	4,8,16	1,0	15,3±1,0	233,0
ОККО-10-02-1,0	4,8,16	1,0	15,3±1,0	246,0
ОККС-10-01-1,0	4,8,16	1,0	18,2 ^{+2,0} _{-1,0}	320,7
ОККАК-10-01-1,0	4,8	1,0	24,3 ^{+2,0} _{-1,0}	1190,0
ОКС-10-01-1,0	4,6	1,0	9,5±0,8	92,6
ОКС-10-02-1,0	1	1,0	5,0±0,8	28,0
ОКС-10-03-1,0	1	1,0	5,0±0,8	30,0
ОКС-10-04-1,0	1	1,0	3,5±0,5	7,6

Оптический модуль, изготовленный из полиэтилена или другого полимерного материала, может содержать одно, два или четыре ОВ. Внутреннее пространство ОМ заполняется гидрофобным составом по всей длине, наружный диаметр ОМ составляет $2,0 \pm 0,2$ мм. Свободные промежутки между скрученными элементами кабеля также заполняются гидрофобным составом по всей длине кабеля.

В кабелях марок ОКК 50 01, ОКК 10-01, ОКК-50-02, ОКК-10 02 поверх сердечника накладывается защитная полиэтиленовая оболочка номинальной толщиной 2,2 мм. В кабелях марок ОКС-50-01 и ОКС-10 01 поверх сердечника накладывается защитная оболочка из поливинилхлоридного пластика номинальной толщиной 1,7 мм.

В кабелях марок ОККС-50 01, ОККС-10-01 поверх промежуточной оболочки накладывается броня из 12—18 стеклопластиковых стержней, в кабелях марок ОККО-50 01, ОККО-10 01, ОККО 50-02, ОККО-10-02 — металлическая оплетка плотностью 70—80%. Поверх стержней или оплетки накладываются полиэтиленотерефталатная или фторопластовая лента и защитная оболочка из полиэтилена номинальной толщиной 2,2 мм.

В кабелях марок ОККАК-50-01, ОККАК-10 01 поверх сердечника накладываются промежуточная оболочка из поливинилхлоридного пластика толщиной не менее 1,0 мм, алюминиевая сварная оболочка толщиной не менее 1,0 мм, битумное покрытие, промежуточная оболочка из ПЭ номинальной толщиной 1,0 мм, броня из круглых стальных проволок диаметром $2,8 \pm 0,2$ мм, битумное покрытие и защитный шланг из полиэтилена номинальной толщиной 2,2 мм.

Оптические характеристики кабелей ОКК

Коэффициент затухания в ОВ	см. табл. 39 и 310
Дисперсия сигнала одномодового ОВ, пс/(нм·км), не более	3,5
Коэффициент широкополосности градиентного ОВ на длине волны 1,3 мкм, МГц·км, не менее	1000
Эффективная числовая апертура градиентного ОВ	$0,2 \pm 0,02$
Длина отсечки одномодового ОВ, мкм	1,10...1,28

Растягивающие усилия, Н, для кабелей.

ОКС-50-04, ОКС-10-04	50
ОКС-50-01, ОКС-10-01, ОКС-50-02, ОКС-10-02	300
ОКС-50-03, ОКС-10-03	300
ОКК-50-01, ОКК-10-01, ОККО-50-01, ОККО-10-01	2500
ОКК-50-02, ОКК-10-02, ОККО-50-02, ОККО-10-02	3000
ОККС-50-01, ОККС-10-01	3500
ОККАК-50-01, ОККАК-10-01	25000

Раздавливающие усилия на длине 1 см для кабелей ОКК-50-01, ОКК-10-01, ОКК-50-02, ОКК-10-02, ОККО-50-01, ОККО-10-01, ОККО-50-02, ОККО-10-02, ОККС-50-01, ОККС-10-01, ОККАК-50-01, ОККАК-10-01 до 1000 Н и для кабелей, прокладываемых внутри станций, до 50 Н

Кабели марок ОКК-50-01, ОКК-50-02, ОКК-10-01, ОКК-10-02, ОКС-50-01, ОКС-10-01 должны быть стойкими к изгибам (20 циклов) с радиусом, равным 250 мм, на угол $\pm 90^\circ$ при температуре не ниже -10°C

Надежность кабелей

минимальная наработка до отказа кабеля в режимах и условиях, установленных в настоящих технических условиях, не менее 215 000 ч,

минимальный срок сохранности при хранении в отапливаемых хранилищах 25 лет, из них 10 лет — в полевых условиях под навесом при герметичной заделке концов,

минимальный срок службы кабеля, включающий срок сохранности при соблюдении требований к условиям эксплуатации, 25 лет

3.10. Оптические кабели зоновой связи

Отечественный кабель зоновой связи марки ОЗКГ (рис 3 13) имеет профилированный пластмассовый сердечник с восемью геликоидальными пазами, в которых размещены оптические волокна. В центре расположен силовой упрочняющий элемент. По периферии имеются стальные и медные проволоки для дистанционного электропитания регенерационных пунктов. Снаружи — полиэтиленовая оболочка. Сердечник заполнен гидрофобной влагостойкой массой.

Маркировка кабеля: ОЗКГ — оптический зонный кабель для прокладки в грунте,

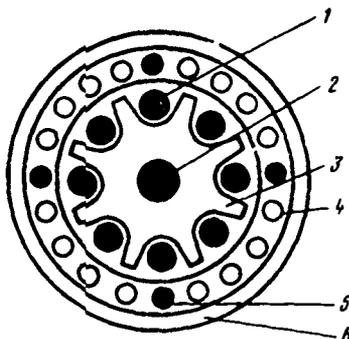


Рис 3 13 Оптический кабель зоновой связи

1 — волокно, 2 — силовой элемент, 3 — профилированный сердечник, 4 — стальные проволоки, 5 — медные проволоки, 6 — полиэтиленовая оболочка

1 — первая разработка; 0,7-1,0-1,5 — коэффициент затухания, дБ/км: дробь — в числителе число волокон, а в знаменателе число медных жил для ДП

Четырехволоконный кабель ОК-4 имеет принципиально ту же конструкцию, что и восьмиволоконный кабель повивной скрутки, но только четыре волокна в нем заменены пластмассовыми стержнями

В России применяются следующие марки и конструкции кабелей ЗС:

ОЗКГ-1-0,7-4/4	Кабель оптический с металлическими армирующими элементами, центральным профилированным элементом, в пазы которого уложены оптические волокна с четырьмя медными жилами для дистанционного питания аппаратуры, четырем ОВ с градиентным профилем показателя преломления и коэффициентом затухания не более 0,7 дБ/км
ОЗКГ-1-0,7-8/4	То же, с восемью волокнами
ОЗКГ-1-0,7-4/0	То же, без медных жил, с четырьмя волокнами
ОЗКГ-1-0,7-8/0	То же, с восемью волокнами
ОЗКГ-1-1,0-4/4	То же, что ОЗКГ-1-0,7-4/4, но с коэффициентом затухания 0,7 1,0 дБ/км
ОЗКГ-1-1,0-8/4	То же, с восемью волокнами
ОЗКГ-1-1,0-4/0	То же, без медных жил и с четырьмя волокнами
ОЗКГ-1-1,0-8/0	То же, с восемью волокнами
ОЗКГ-1-1,5-4/4	То же, что ОЗКГ-1-0,7-4/4, но с коэффициентом затухания 1,0 1,5 дБ/км
ОЗКГ-1-1,5-8/4	То же, с восемью волокнами
ОЗКГ-1-1,5-4/0	То же, но без медных жил и четырьмя волокнами
ОЗКГ-1-1,5-8/0	То же, с восемью волокнами

Конструктивные размеры кабеля приведены в табл 38
 Максимальная масса 1 км кабеля приведена в табл 39

Таблица 38

Количество ОВ в кабеле	Диаметр профилированного элемента, мм	Диаметр по внутренней оболочке, мм	Диаметр по наружной оболочке, мм
4	6,0±0,3	8,0±0,5	18,0 ^{+2,0} _{-1,0}
8	7,0±0,3	9,0±0,5	19,0 ^{+2,0} _{-1,0}

Таблица 39

Марка кабеля	Масса 1 км кабеля, кг	
	номинальная расчетная	максимальная
ОЗКГ 4/4	358	360
ОЗКГ 4/0	353	355
ОЗКГ 8/4	395	400
ОЗКГ 8/0	390	395

Строительная длина кабеля не менее 2200 м. Допускается поставка кабеля длиной не менее 1000 м в количестве не более 30% от общей длины сдаваемой партии

Конструкция кабелей

диаметр сердцевин 50±3 мкм;

диаметр оболочки 125±3 мкм,

неконцентричность оболочки по отношению к сердцевине не более 6%;

некруглость сердцевин не более 6%,

некруглость оболочки не более 2,0%,

наружный диаметр защитного покрытия 250±30 мкм.

В качестве защитного покрытия ОВ применяют эпоксиакрилат

Центральный профилированный элемент выполнен из поливинилхлоридного пластика и армирован тефлоновыми нитями или нитями СВМ

В каждый паз профилированного элемента укладывают одно ОВ

Наружная оболочка кабеля должна быть герметичной и светостойкой

Оптические характеристики

коэффициент затухания, дБ/км, на волне длиной 1,3 мкм для кабеля:

ОЗКГ-1-0,7	0,7
ОЗКГ-1-1,0	0,7 1,0
ОЗКГ-1-1,5	1,0 1,5

полоса пропускания, не менее, МГц, кабеля длиной 1 км на волне длиной 1,3 мкм для кабеля:

ОЗКГ-1-0,7 и ОЗКГ-1-1,0	800
ОЗКГ-1-1,5	500

Переходное затухание между двумя любыми оптическими волокнами на ближнем и дальнем концах строительной длины кабеля должно быть не менее 120 дБ на длине волны 1,3 мкм, апертура составляет $0,2 \pm 0,02$

Кабель выдерживает растягивающие усилия не менее 3000 Н и раздавливающие усилия не менее 1000 Н. Радиус изгиба кабеля не менее 20 диаметров. Кабель выдерживает 20 циклов изгибов при температуре -10°C на угол $\pm 0,5$ рад при радиусе изгиба 250 мм и 10 перемоток с барабана на барабан с радиусом шейки не более 250 мм при температуре не выше -10°C . Кабель выдерживает 10 циклов осевых закручиваний на угол ± 2 рад на длине 2 м при температуре -10°C .

Кабель выдерживает вибрационные нагрузки в диапазоне частот 10 . 80 Гц с ускорением до $40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ и одиночные удары с ускорением $1000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ и длительностью импульса $2,0 \pm 0,5$ мс.

Кабель работает в диапазоне температур $-40 \dots +55^\circ\text{C}$.

Электрические параметры кабеля:

электрическое сопротивление изоляции на длине кабеля 1 км каждой медной жилы относительно остальных медных жил, соединенных со стальными элементами, должно быть не менее 100 МОм;

электрическое сопротивление изоляции на длине кабеля 1 км наружной полиэтиленовой оболочки, измеренное между всеми металлическими элементами и водой, должно быть не менее 10 МОм;

испытательное напряжение между двумя медными жилами и между любой жилой и армирующими элементами должно быть не менее 3 кВ переменного тока

Минимальная наработка на отказ строительной длины (2,2 км) оптического кабеля составляет 215 000 ч

Минимальный срок сохранности кабеля при хранении, а также вмонтированного в защитную аппаратуру или находящегося в защищенном комплекте ЗИП составляет 25 лет, из них в полевых условиях под навесом — 10 лет

Минимальный срок службы кабеля при соблюдении требований к условиям эксплуатации 25 лет

Зоновый оптический кабель второго поколения ОКЗ. Сердечник кабеля состоит из восьми модулей. В четырех из них расположены четыре или восемь многомодовых волокон, а остальные содержат четыре медные изолированные жилы диаметром 1,2 мм для дистанционного электропитания регенераторов

Снаружи кабеля имеются полиэтиленовая оболочка и защитно-броневой покров. Возможны различные варианты брони: стальные круглые проволоки (ОКЗК), бронеленты (ОКЗБ), стеклопластиковые стержни (ОКЗС), стальная оплетка (ОКЗО). Изготавливаются также подводные кабели с алюминиевой оболочкой и круглой стальной броней (ОКЗМК). Станционные кабели маркируются ОКС.

Кабель предназначен для систем передачи ИКМ-480. Работает на волне 1,3 мкм. Коэффициент затухания кабеля 0,7 . 1,5 дБ/км, полоса частот 500 . 800 МГц. Участок 30 км. Диаметр кабеля 18 . 20 мм. Масса 300 450 кг/км

3.11. Оптические кабели магистральной связи ОМЗКГ

Для магистральной связи применяются ОК с 4,8 или 16 волокнами. На рис. 3.14 показан 8-волоконный отечественный кабель марки ОМЗКГ.

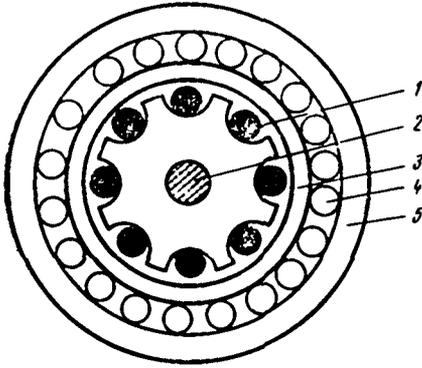


Рис. 3.14 Оптический кабель магистральной связи типа ОМЗКГ:

1 - волокно, 2 - силовой элемент; 3, 5 - внутренняя и внешняя полиэтиленовые оболочки, 4 - армирующие нити из стеклопластика

Маркировка кабеля: ОМЗКГ — оптический магистральный и зонный кабель для прокладки в грунт, 10 — диаметр сердцевины одномодового волокна, 1, 2, 3 — номер разработки, 0,7 — коэффициент затухания, дБ/км, 4,8 — число волокон.

Применяются следующие марки и конструкции магистральных кабелей:

- ОМЗКГ-10-1-0,7-8 . Кабель оптический магистральный и внутризональный, разработки 1, с центральным профилированным элементом, в пазы которого уложены одномодовые ОВ с диаметром модового поля 10 мкм, гидрофобным наполнителем, броней из неметаллических армирующих элементов в виде стеклопластиковых стержней и стеклонитей, в полиэтиленовой оболочке, коэффициентом затухания до 0,7 дБ/км и восемью ОВ
- ОМЗКГ-10-1-0,7-4 . То же, с четырьмя ОВ
- ОМЗКГ-10-2-0,7-8 . Кабель оптический магистральный и внутризональный, разработки 2, с центральным профилированным и армированным стеклопластиком элементом, в пазы которого уложены одномодовые ОВ с диаметром модового поля 10 мкм, гидрофобным наполнителем, броней из неметаллических армирующих элементов в виде стеклонитей, в ПЭ оболочке, коэффициентом затухания до 0,7 дБ/км и восемью ОВ
- ОМЗКГ-10-2-0,7-4 . То же, с четырьмя ОВ
- ОМЗКГ-10-3-0,7-8 . Кабель оптический магистральный и внутризональный, разработки 3, с центральным профилированным элементом, в пазы которого уложены одномодовые ОВ с диаметром модового поля 10 мкм, гидрофобным наполнителем, броней из стальных проволок, в ПЭ оболочке, коэффициентом затухания до 0,7 дБ/км и восемью ОВ
- ОМЗКГ-10-3-0,7-4 . То же, с четырьмя ОВ
- ОМЗВ-10-1-0,7-8 . Кабель оптический магистральный и внутризональный для прокладки через судоходные и сплавные реки, болота глубиной более 2 м, разработки 1, с центральным профилированным элементом, в пазы которого уложены одномодовые ОВ с диаметром модового поля 10 мкм, с гидрофобным наполнителем, металлической трубкой, броней из стальных проволок, ПЭ оболочкой, коэффициентом затухания до 0,7 дБ/км и восемью ОВ
- ОМЗВ-10-1-0,7-4 . То же, с четырьмя ОВ
- ОН-10-1-1,0-1 . Кабель оптический стационарный на основе одномодового ОВ с диаметром модового поля 10 мкм, разработки 1, с наружной оболочкой из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ), затуханием до 1,0 дБ/км и одним ОВ

Конструктивные размеры элементов магистральных кабелей приведены в табл 3 10

Масса кабелей приведена в табл 3 11

Таблица 3 10

Марка кабеля	Диаметр центрального элемента, мм	Диаметр по внутренней оболочке, мм	Раднальная толщина наружной оболочки, мм, не менее	Наружный диаметр кабеля, мм
ОМЗКГ-10-1-0,7-8 ОМЗКГ-10-1-0,7-4 ОМЗКГ-10-2-0,7-8 ОМЗКГ-10-2-0,7-4 ОМЗКГ-10-3-0,7 8 ОМЗКГ-10-3-0,7-4	6,0±0,3	8,0±0,5	2,0	18,0 ^{+2,0} _{-1,0}
ОМЗВ-10-1-0,7-8 ОМЗВ-10-1-0,7-4	6,0±0,3	11,0±0,6	2,5	22,0 ^{+2,0} _{-1,0}
ОН 10-1-1,0-1	—	—	0,5	3,0±0,5

Таблица 3 11

Марка кабеля	Масса 1 км кабеля, кг		Марка кабеля	Масса 1 км кабеля, кг	
	рас- чет- ная	мак- си- маль- ная		рас- чет- ная	мак- си- маль- ная
ОМЗКГ-10-1-0,7-8	314	328	ОМЗКГ-10-3-0,7-4	353	379
ОМЗКГ-10 1-0,7-4	314	328	ОМЗВ-10-1-0,7-8	966	1000
ОМЗКГ-10-2-0,7-8	304	328	ОМЗВ-10 1 0,7 4	966	1000
ОМЗКГ-10-2-0,7-4	304	328	ОН-10-1-1,0-1	9	10
ОМЗКГ-10 3 0,7-8	353	379			

Строительная длина магистрального и внутризонового кабелей должна быть не менее 2000 м, а станционного — не менее 200 м

Одномодовое оптическое волокно имеет следующие геометрические размеры диаметр модового поля 10 ± 1 мкм, диаметр оболочки 125 ± 3 мкм, неконцентричность сердцевины и оболочки 1,0 мкм Защитное покрытие ОВ из эпоксикрилата

В кабелях ОМЗКГ-10-1, ОМЗКГ-10-3 и ОМЗВ-10-1 центральный профилированный элемент выполнен из ПВХ пластиката и армирован тефлоновыми нитями, нитями СВМ или стеклопластиком В кабелях ОМЗКГ-10-2 центральный профилированный элемент выполнен из ПВХ пластиката и армирован стеклопластиком В каждый паз профилированного элемента уложено одно или два ОВ и свободное пространство заполнено гидрофобным составом по всей длине кабеля Профилированный элемент обмотан скрепляющей фторопластовой или полиэтилентерефталатной лентой

В кабелях ОМЗКГ-10 поверх сердечника наложена оболочка из ПВХ пластика. В кабелях ОМЗВ-10-1 поверх сердечника наложена металлическая (медная, алюминиевая) трубка минимальной толщиной 0,6 мм и подушка из ПЭ с минимальной толщиной 1,5 мм.

В кабелях ОМЗКГ-10-1 поверх ПВХ оболочки наложена броня не менее чем из 12 армирующих элементов, при этом не менее половины от общего числа элементов — из стеклопластика, а остальные — из стеклонитей в оболочках из ПЭ. В кабелях ОМЗКГ-10-2 поверх ПВХ оболочки наложена броня не менее чем из 12 армирующих элементов из стеклонитей в оболочках из ПЭ. В кабелях ОМЗКГ-10-3 поверх ПВХ оболочки, а в кабелях марки ОМЗВ-1 поверх подушки из ПЭ наложена броня не менее чем из 12 стальных проволок.

В кабелях ОМЗКГ-10-3 стальные проволоки диаметром $1,2 \pm 0,2$ мм покрыты оболочками из ПЭ наружным диаметром $2,8 \pm 0,2$ мм.

В кабелях ОМЗКГ-10 броня обмотана скрепляющей фторопластовой или полиэтилентерефталатной лентой.

Наружная оболочка кабелей ОМЗКГ-10 и ОМЗВ-10-1 выполнена из полиэтилена.

В кабеле ОН-10 1-1,0-1 одно ОВ и заполняющие стеклонити покрыты защитной оболочкой из ПВХ пластика. Наружный диаметр кабеля $3,0 \pm 0,5$ мм.

В кабелях ОМЗКГ-10 и ОМЗВ-10-1 в двух соседних пазах профилированного элемента имеются нити разного цвета для маркировки.

Пространство между армирующими элементами кабеля заполнено гидроробным составом по всей длине кабеля.

Наружная оболочка кабеля должна быть герметичной и светостойкой.

Коэффициент затухания магистрального и внутризонального кабелей на длине волны 1,3 мкм должен быть не более 0,7 дБ/км, а стационарного — не более 1,0 дБ/км. Дисперсия сигнала в ОВ должна быть не более 6 пс/нм·км в диапазоне 1,285–1,34 мкм и не более 3,5 пс/нм·км в диапазоне 1,285–1,33 мкм. Длина волны отсечки находится в пределах 1,10–1,28 мкм.

Магистральные и внутризональные кабели выдерживают растягивающие усилия, численно равные весу 1 км кабеля, а стационарный кабель — до 50 Н.

Линейные кабели должны быть стойкими к раздавливающим усилиям до 1000 Н на длине 2 см кабеля, а стационарный кабель — до 50 Н на длине 1 см. Линейные кабели выдерживают многократные изгибы в стационарном состоянии с радиусом изгиба, равным 20 номинальным диаметрам кабеля, и 20 циклов изгибов с радиусом, равным 20 номинальным диаметрам кабеля, на угол $\pm 0,5$ рад при температуре -10°C . Стационарные кабели выдерживают изгибы в стационарном состоянии с радиусом изгиба, равным 15 номинальным диаметрам кабеля, и 20 циклов изгибов на угол $\pm 0,5$ рад с радиусом, равным 20 номинальным диаметрам кабеля.

Линейные кабели выдерживают 10 циклов перемоток с барабана на барабан с радиусом шейки, равным 20 номинальным диаметрам кабеля, при температуре до -10°C и 10 циклов осевых закручиваний на угол ± 2 рад на длине $2 \pm 0,2$ м при температуре до -10°C . Кабели пригодны для механизированной прокладки.

Кабели выдерживают вибрационные нагрузки в диапазоне частот 10–200 Гц с ускорением до $40 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ и многократные удары с ускорением до $400 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Температурный диапазон использования линейных кабелей от -40 до $+50^\circ\text{C}$, а стационарных — от -10 до $+50^\circ\text{C}$.

Надежность кабелей

минимальная наработка на отказ строительной длины кабелей должна быть не менее 215 000 ч,

минимальный срок хранения кабелей в отапливаемых помещениях 25 лет, из них в полевых условиях и под навесом — 10 лет,

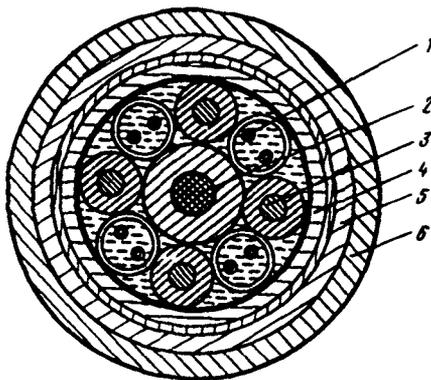
минимальный срок службы кабелей при соблюдении требований к условиям эксплуатации составляет 25 лет.

3.12. Оптические кабели магистральной связи ОКЛ

Линейные кабели ОКЛ предназначены для одномодовой связи на волне 1,55 мкм. Отличительной особенностью этих кабелей является наличие медных проводов для дистанционного электропитания. Они изготавливаются емкостью 4,8 и 16 волокон. Один из конструктивных вариантов кабеля ОКЛ приведен на рис. 3.15. Для одномодовой связи изготавливаются также стационарные кабели марки ОКС.

Рис. 3.15 Оптический магистральный кабель типа ОКЛ

1 — волокно, 2 — силовой элемент, 3 — медный проводник, 4 и 6 — внутренняя и внешняя полиэтиленовые оболочки, 5 — стальная лента



Маркировка: ОКЛ — оптический кабель линейный; ОКЛС — то же, с броней из стеклопластиковых стержней; ОКЛБ — то же с броней из ленточной стали; ОКЛК — то же с броней из круглых стальных проволок; ОКЛАК — то же в алюминиевой оболочке и с броней из круглых стальных проволок; ОКС — оптический кабель стационарный.

Марки магистральных кабелей ОКЛ и ОКС, их конструкция и область применения приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Марка кабеля	Назначение и основные элементы конструкции	Область применения
ОКЛ-01	Кабель магистральный и внутризоновый, с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, вокруг которого скручены оптические модули (ОМ), с гидрофобным заполнением и защитной оболочкой из ПЭ	Для прокладки в канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах и в шахтах
ОКЛ-02	То же, но со стальным тросом в центре	Для прокладки в грунтах всех категорий, в том числе зараженных грызунами, кроме подверженных мерзлотным деформациям, в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах и в шахтах, через неглубокие болота и несудоходные реки, в условиях повышенных электромагнитных влияний
ОКЛС-01	Кабель магистральный и внутризоновый, с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, вокруг которого скручены ОМ, с гидрофобным заполнением, промежуточной оболочкой из ПЭ, броней из стеклопластиковых стержней и защитной оболочкой из ПЭ	
ОКЛС-03	Кабель магистральный и внутризоновый, с центральным профилированным элементом, армированным	То же

Марка кабеля	Назначение и основные элементы конструкций	Область применения
ОКЛК-03	<p>стеклопластиковым стержнем, в пазы которого уложены оптические волокна, с гидрофобным заполнением, промежуточной оболочкой из ПВХ пластика, броней из стеклопластиковых стержней и защитной оболочкой из ПЭ</p> <p>То же, с броней из стальных проволок</p>	<p>Для прокладки в грунтах всех категорий, в том числе зараженных грызунами, кроме подверженных мерзлотным деформациям, в кабельной канализации, трубах, блоках, коллекторах, на мостах и в шахтах, через неглубокие болота и несудоходные реки</p>
ОКЛБ-01	<p>Кабель магистральный и внутризональный, с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, вокруг которого скручены ОМ или ОМ и жилы для ДП, с гидрофобным заполнением, промежуточной оболочкой из ПЭ, броней из стальных лент и защитной оболочкой из ПЭ</p>	<p>То же</p>
ОКЛАК-01	<p>Кабель магистральный и внутризональный, с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, вокруг которого скручены ОМ или ОМ и жилы для ДП, с гидрофобным заполнением, алюминиевой оболочкой, промежуточной оболочкой из ПЭ, броней из стальных проволок и защитной оболочкой из ПЭ</p>	<p>Для прокладки через судоходные реки и болота глубиной более 2 м и в мерзлотных грунтах</p>
ОКС-01	<p>Кабель стационарный четырехволоконный, с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, гидрофобным заполнением и защитной оболочкой из ПВХ пластика</p>	<p>Для прокладки внутри зданий и в НРП</p>
ОКС 04	<p>Кабель стационарный одноволоконный, с силовым элементом из стеклопластикового стержня и защитной оболочкой из ПВХ пластика</p>	<p>То же</p>
ОКС-05	<p>То же, с силовым элементом из стальной проволоки</p>	<p>»</p>
ОКС-06	<p>Кабель стационарный одноволоконный, с упрочняющими стеклонитями и защитной оболочкой из ПВХ пластика</p>	<p>»</p>

Кабели марок ОКЛ-01, ОКЛ-02, ОКЛС 01, ОКЛС 03 ОКЛК 03 и ОКЛБ 01 могут изготавливаться с наружной защитной оболочкой, не распространяющей горение, при этом в марке кабеля добавляется буква Н
Характеристики кабелей ОКЛ и ОКС приведены в табл 3 13

Таблица 3 13

Обозначение кабеля	Число ОВ	Число и диаметр медных жил, мм	Кэф- фици- ент за- туха- ния не бо- лее, дБ/км	Дис- персия пс(нм× Х км) не бо- лее	Наружный диаметр, мм	Расчетная масса 1 км, кг
ОКЛ 01-0,3/ /3,5 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	3,5	10,8±1,0	90,0
ОКЛ 01 0,3/ /2,0 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	2,0		
ОКЛ 02 0,3/ /3,5 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	3,5	12,4±1,2	134,0
ОКЛ 02 0,3/ /2,0 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	2,0		
ОКЛС 01 0,3/ /3,5 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	3,5	18,8±2,0	320,0
ОКЛС 01 0,3/ /2,0 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	2,0		
ОКЛС 03 0,3/3,5 4(8)	4,8	—	0,3	3,5	16,8±2,0	277,0
ОКЛС 03 0,3/2,0 4(8)	4,8	—	0,3	2,0		
ОКЛК 03 0,3/3,5 4(8)	4,8	—	0,3	3,5	18,4±2,0	365,0
ОКЛК 03 0,3/2,0 4(8)	4,8	—	0,3	2,0		
ОКЛБ /1 0,3/ /3,5 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	3,5	18,4±0,2	404,0
ОКЛБ 01 0,3/ /2,0 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	2,0		
ОКЛБ 01 0,3/ /3,5 4/4(8/4)	4,8	4×1,2	0,3	3,5	18,4±2,0	440,0
ОКЛБ 01 0,3/ /2,0 4/4(8/4)	4,8	4×1,2	0,3	2,0		
ОКЛАК 01 0,3/ /3,5 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	3,5	24,8±2,5	1342
ОКЛАК 01 0,3/ /2,0 4(8,16)	4,8,16	—	0,3	2,0		
ОКЛАК 01 0,3/ /3,5 4/4(8/4)	4,8	4×1,2	0,3	3,5	24,8±2,5	1382,0
ОКЛАК 01 0,3/ /2,0 4/4(8/4)	4,8	4×1,2	0,3	2,0		
ОКС 01 1,0/3,5 4	4	—	1,0	3,5	9,8±0,8	96,0
ОКС 04 1,0/3,5 1	1	—	1,0	3,0	5,0±0,8	30,0
ОКС 05 1,0/3,5 1	1	—	1,0	3,5	5,0±0,8	30,0
ОКС 06 1,0/3,5 1	1	—	1,0	2,5	3,0±0,5	7,6

Строительная длина магистральных и внутризоновых кабелей должна быть не менее 2000 м. Строительная длина станционных кабелей должна быть не менее 300 м.

Одномодовое оптическое волокно имеет следующие геометрические размеры: диаметр модового поля $8,5 \pm 1,0$ мкм, диаметр оболочки 125 ± 3 мкм, неконцентричность сердцевины и оболочки не более 0,7 мкм.

Кабели ОКЛ 01, ОКЛБ-01, ОКЛС-01, ОКЛК-01, ОКС 01 имеют центральный силовой элемент из стеклопластикового стержня, а кабели ОКЛ 02 — из стального троса, изолированного полиэтиленом.

В кабелях ОКЛ 01 и ОКЛ 02 поверх сердечника наложена наружная защитная оболочка из ПЭ номинальной толщиной 2,2 мм, в кабеле ОКС 01 — из ПВХ пластиката номинальной толщиной 1,7 мм, в кабелях ОКЛБ 01 и ОКЛС 01 — промежуточная оболочка из ПЭ толщиной не менее 1,0 мм, в кабелях ОКЛС-03 и ОКЛК-03 — промежуточная оболочка из ПВХ пластиката толщиной не менее 0,8 мм.

Кабели из ОКЛС 01 и ОКЛС 03 поверх промежуточной оболочки имеют броню из 12—18 стеклопластиковых стержней, а кабели ОКЛК-03 — из металлических проволок, покрытых полиэтиленовыми оболочками. Поверх скрепляющей ленты наложена наружная защитная оболочка из полиэтилена номинальной толщиной 2,2 мм.

В кабелях ОКЛБ-01 поверх промежуточной оболочки наложена лента крепированной бумаги, броня из двух стальных лент, битумное покрытие и защитный шланг из полиэтилена номинальной толщиной 2,2 мм.

В кабелях ОКЛК 01 поверх сердечника наложены промежуточная оболочка из поливинилхлоридного пластиката толщиной не менее 1,0 мм, алюминиевая или медная сварная оболочка толщиной не менее 1,0 мм, битумное покрытие, промежуточная оболочка из ПЭ толщиной не менее 1,0 мм, броня из круглых стальных проволок диаметром $2,8 \pm 0,2$ мм, битумное покрытие и защитный шланг из полиэтилена номинальной толщиной 2,2 мм.

Кабели ОКС-04 и ОКС 05 содержат параллельно расположенные одно ОВ и упрочняющий элемент из стеклопластикового стержня или стальной волокни, опрессованные общей ПВХ оболочкой.

Электрические характеристики кабелей, содержащих медные жилы для ДП:

электрическое сопротивление токопроводящих жил постоянному току, пересчитанное на 1 км длины и $t = 20^\circ \text{C}$, не более 16 Ом,

электрическое сопротивление изоляции жил, пересчитанное на 1 км длины и $t = 20^\circ \text{C}$, не менее 10 000 МОм;

кабель должен выдерживать испытание номинальным напряжением между жилами 5000 В постоянного тока или 2500 В переменного тока частотой 50 Гц в течение 2 мин,

кабель должен выдерживать испытание номинальным напряжением между жилами и остальными металлическими элементами, соединенными вместе, 20 кВ постоянного тока или 10 кВ переменного тока частотой 50 Гц в течение 5 с,

кабель должен выдерживать испытание номинальным напряжением между металлической оболочкой и броней, броней и водой 20 кВ постоянного тока или 10 кВ переменного тока частотой 50 Гц в течение 5 с.

Ниже приводятся нормы стойкости кабелей к растягивающим усилиям, Н:

ОКС-06	50
ОКС-01, ОКС-04, ОКС-05	300
ОКЛ-01	1000
ОКЛ-02, ОКЛС-03	2500
ОКЛС-01	3000
ОКЛБ-01, ОКЛК-03	3500
ОКЛАК-01	25000

Нормы стойкости кабелей к раздавливающим усилиям на длине 1 см для магистральных и внутризоновых кабелей не более 1000 Н, а для станционных кабелей не более 50 Н

Кабели ОКЛ-01, ОКЛ-02, ОКС-01, ОКС-04, ОКС-05, ОКС-06 должны выдерживать 20 циклов изгибов с радиусом, равным 250 мм, на угол $\pm 90^\circ$ при температуре не ниже -10°C

Кабели ОКЛС-01, ОКЛС-03, ОКЛК-03 и ОКЛБ-01 должны быть стойкими к изгибам (20 циклов) с радиусом, равным 3600 мм, на угол $\pm 90^\circ \text{C}$ при температуре не ниже -10°C

Основные характеристики оптических кабелей отечественного производства приведены в табл. 3.14

Таблица 3.14

Характеристика	ГТС		ЗС ОЗКГ	МС		
	ОК-50	ОКК		ОМЗКГ	ОКЛ	
Система передачи	«Соната 2»	ИКМ 4/5	«Сопка 3»	«Сопка-4»	«Сопка-4М», «Сопка-5»	
Число каналов	120	120 480	480	1920	1920 7680	
λ , мкм	0,85	1,3	1,3	1,3	1,55	
α , дБ/км	3	0,7 1	0,7 1,0	0,7	0,3	
ΔF , МГц км	250 .. 500	1000	500 800	5000	5000	
Длина регенерационного участка, км	12	30	30	40	100	
Число волокон	4,8	4,8,16	4,8	4,8,16	4,8,16	
Тип волокна	МОВ	ООВ и МОВ	МОВ	ООВ	ООВ	
Подземные	d , мм Q , кг/км P , Н	11. 15 100 300 1200	12 .. 18 110 ... 320 300 .. 3500	17 370 3000	12 .18 130 400 1300 4000	14 18 140 404 1000 3500
Подводные	d , мм Q , кг/км P , Н	— — —	24 1200 25000	— — —	— — —	25 1300 25000
Строительная длина, км	1 ... 2		2	2		
Срок службы, лет	25		25	25		
Электропитание	Местное		Дистанционное	Автономное от электросети		

Примечание. ΔF — коэффициент широкополосности, Q — масса P — разрывная прочность.

Кабели должны выдерживать 10 пермоток с барабана на барабан с радиусом шейки, равным 20 номинальным диаметрам кабеля, при температуре не ниже -10°C .

Кабели ОКЛ-01, ОКЛ-02, ОКЛС-01, ОКЛС-03, ОКЛК-03 и ОКЛБ-01 должны выдерживать 10 циклов осевых закручиваний на угол $\pm 360^{\circ}$ на длине $1,0 \pm 0,2$ м при температуре не ниже -10°C .

Кабели должны быть стойкими к следующим внешним воздействующим факторам:

вибрационным нагрузкам в диапазоне частот 10...200 Гц с ускорением до $40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$;

однократным ударом с ускорением до $1000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$;

многократным ударам с ускорением до $400 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$;

воздействию повышенной рабочей температуры среды до 50°C ;

воздействию пониженной рабочей температуры до -40°C ;

воздействию циклической смены температур от -40 до 50°C ;

воздействию повышенной влажности воздуха до 98% при температуре 35°C .

Стационарный кабель должен быть стойким к воздействию температуры от 55 до -10°C .

Надежность кабелей:

минимальная наработка кабелей до отказа в режимах и условиях, оговоренных в настоящих технических условиях, должна быть не менее 215 000 ч;

минимальный срок сохранности кабелей в отапливаемых помещениях и при герметичной заделке концов 25 лет, из них в полевых условиях под навесом — 10 лет;

минимальный срок службы кабелей, включая срок сохраняемости, при соблюдении требований к условиям эксплуатации должен быть 25 лет

3.13. Оптические кабели сельской связи

Кабели сельской связи предназначены для организации связи между райцентром и сельскими предприятиями (совхозами, колхозами, фабриками). Как правило, они имеют четырехволоконную конструкцию и подвешиваются по опорам или прокладываются в землю.

Подземный и подвесной кабели показаны на рис. 3.16 Другой вариант подвесного кабеля показан на рис. 3.17.

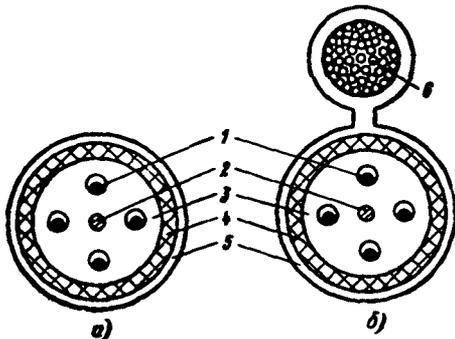


Рис. 3.16 Оптический кабель сельской связи.

а — подземный; б — подвесной; 1 — волокно; 2 — силовой элемент; 3 — пластмассовый сердечник; 4 — стальная оплетка; 5 — полиэтиленовая оболочка; 6 — стальной трос

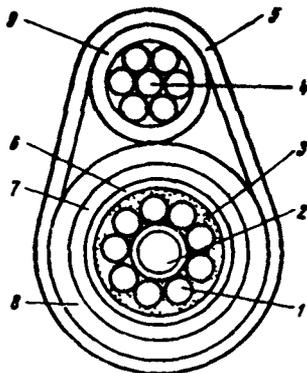


Рис. 3.17. Оптический кабель с несущим тросом

1 — волокно, 2 — армирующий элемент, 3 — заполнение, 4 — стальной трос; 5 — внешняя пластмассовая оболочка; 6 — алюминиевая фольга; 7 — внутренняя оболочка, 8 — внешняя оболочка кабеля; 9 — внешняя оболочка троса

Основные характеристики оптического кабеля сельской связи диаметр 10 мм; масса 130 кг/км, строительная длина 1 км, длина волны 1,3 мкм, затухание 1 дБ/км, система передачи ИКМ-30×2 и, кроме того, организуется 2—3 канала вещания, полоса пропускания 250...400 МГц·км, дальность связи 30 км (с помощью регенераторов возможно обеспечить большую дальность связи); эксплуатация при температуре —40...50° С, растягивающее усилие не более 3000 Н.

Соединительные и монтажные кабели предназначены для соединения блоков и узлов аппаратуры между собой и для внутриблочного монтажа. Они имеют повивную или ленточную конструкцию; часто применяются и двухволоконные кабели (рис. 3.18).

Получили применение также оптические шнуры (рис 3 19), выполняемые в виде цилиндрической пружины из одноволоконного кабеля. Диаметр кабеля 5 мм, длина 2...3 м, диаметр спирали 20 мм

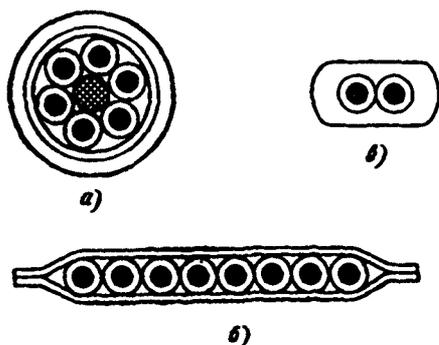


Рис. 3.18. Соединительные кабели
а — повивный, б — ленточный, в — однопарный

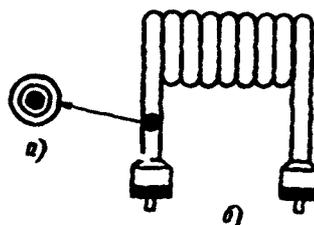


Рис 3 19 Оптический шнур
а — волокно б — спираль из волокон

3.14. Зарубежные конструкции оптических кабелей

Во Франции оптические кабели комплектуются из унифицированных модулей, состоящих из пластмассового стержня диаметром 4 мм с геликои дальними пазами по периметру и десяти оптических волокон, расположенных по периферии в пазах этого стержня (рис 3 20, а) Оптическое волокно имеет кварцевый сердечник диаметром 50 мкм, кварцевую оболочку диаметром 125 мкм и полимерное покрытие диаметром 0,7 1 мм Кабели содержат 1, 2, 4, 7 и больше модулей Снаружи кабель имеет алюминиевую, а затем полиэтиленовую оболочку На рис. 3 20, б показан 70-волоконный кабель.

Американский кабель плоского типа приведен на рис 3 21 Кабель комплектуется из лент, содержащих 12 оптических волокон Ширина ленты 3,56 мм Таких лент в кабеле может быть до 12 Снаружи располагаются пластмассовая оболочка и стальные армирующие проволоки Диаметр кабеля 12 мм. Кабели этого типа применяются для устройства соединительных линий ГТС и организации линий междугородной связи Такой кабель, состоящий из 12 лент, насчитывает до 144 оптических волокон

За рубежом получили применение также ОК большой емкости, которые используются для городской интегральной сети связи многоцелевого назначения В этом случае каждому абоненту подается пара волокон и по ним осуществляется передача различных видов информации (телефонной, много-

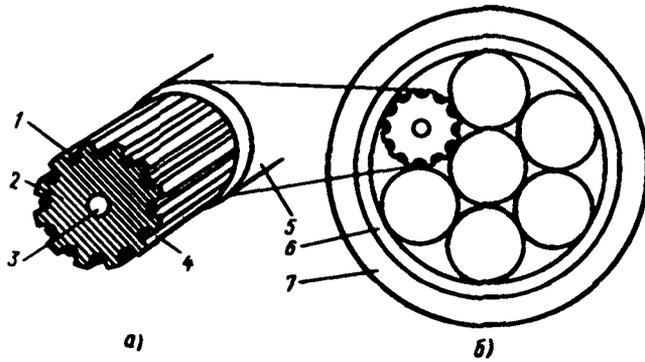


Рис. 3.20. Оптический кабель модульной конструкции:

а — 10-волоконный модуль; *б* — 70-волоконный кабель. 1 — волокно; 2 — профилированный сердечник; 3 — силовой элемент, 4 — пазы, 5, 7 — пластмассовая оболочка; 6 — алюминиевая оболочка

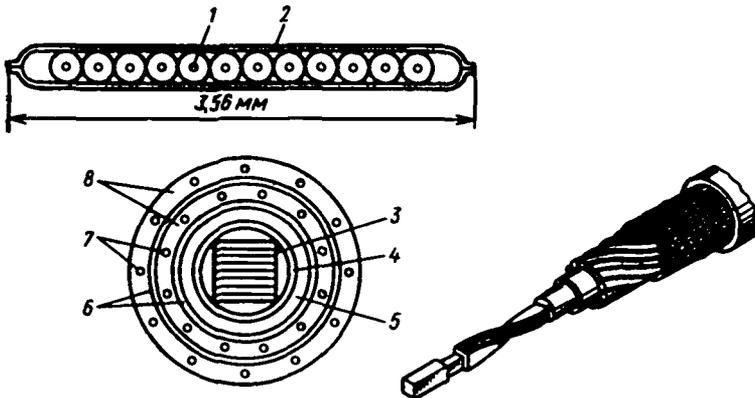


Рис. 3.21. Плоский оптический кабель:

1 — волокно; 2 — полиэтиленовая лента; 3 — стопка лент (144 волокна); 4 — защитное покрытие, 5 — внутренняя полиэтиленовая оболочка, 6 — пластмассовые ленты; 7 — силовые элементы (кевлар); 8 — полиэтиленовая оболочка

программного телевидения, данных ЭВМ, телефакса и др) Такие кабели изготавливаются на 100, 200, 500 и 1000 волокон. На рис 3 22 показан 80 волоконный кабель

Японская конструкция 1000-волоконного ОК приведена на рис. 3 23.

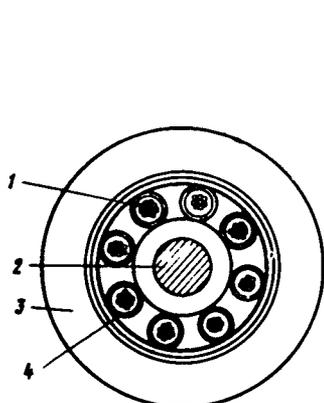


Рис 3 22 Оптический кабель с 80 волокнами

1 — группа из 10 волокон, 2 — силовой элемент 3 — внешняя полимерная оболочка, 4 — ленты

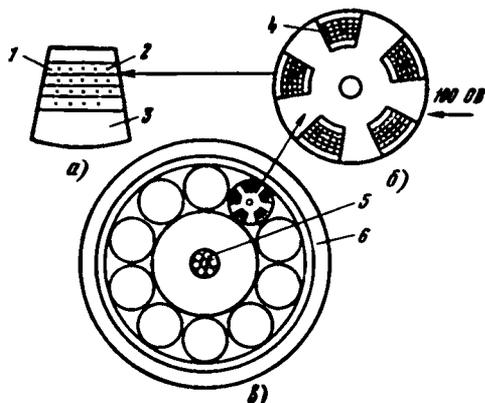


Рис 3 23 Кабель ленточного типа с 1000 волокнами для ГТС

а — группа на 20 волокон, б — группа на 100 волокон, в — сечение 1000-волоконного кабеля: 1 — лента с пятью ОВ, 2 — волокно, 3 — 20 ОВ; 4 — паз, 5 — силовой элемент, 6 — внешняя оболочка

Кабель состоит из 10 пучков, в каждом из которых располагается по 100 волокон ленточной структуры

Для междугородной связи часто применяются ОК с металлическими элементами в виде медных жил Последние используются для организации служебной связи, телеуправления, а также дистанционного электропитания магистрали На рис 3 24 показан такой кабель, содержащий две группы по 12 волокон и четверку медных жил

На рис 3 25 приведена конструкция 12-волоконного ОК с металлической броней для подземной прокладки Кабель имеет два слоя стальных лент

Оптический кабель на 18 волокон без металлических элементов для прокладки в канализации приведен на рис 3 26

В последнее время оптические кабели получили широкое применение на технологических и специальных сетях связи Представляют интерес разработки, проводимые в ряде стран по применению волоконно-оптических систем и кабелей в энергетике (на ЛЭП) В этом случае в первую очередь используются такие достоинства оптических кабелей, как невосприимчивость к электромагнитным помехам и высокая защищенность от импульсов атмосферного электричества

Ведутся также разработки высоковольтных ЛЭП, на которых используются оптические кабели многоканального назначения Оптические кабели,

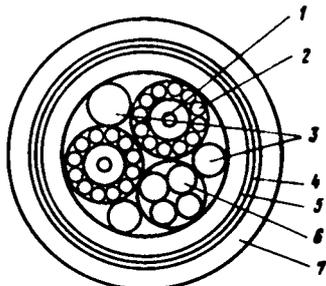


Рис 3 24 Оптический кабель с медными жилами

1, 5 — силовой элемент, 2 — волокно, 3 — заполнение, 4 — внутренняя оболочка, 6 — медные жилы, 7 — наружная оболочка

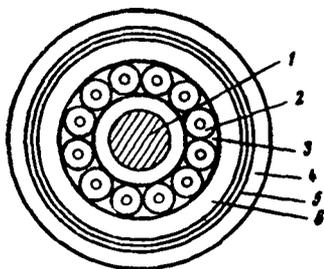


Рис. 3.25. Оптический кабель для подземной прокладки:

1 — силовой элемент; 2 — волокно; 3 — заполнитель; 4 — наружная оболочка; 5 — двойная стальная лента; 6 — внутренняя оболочка

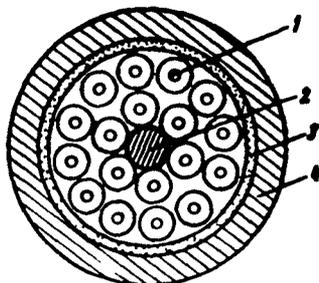


Рис. 3.26. Оптический кабель для прокладки в канализации:

1 — волокно, 2 — силовой элемент, 3 — внутренняя лента; 4 — внешняя пластмассовая оболочка

как правило, расположенные в центре грозозащитного троса или фазного провода, служат для телеуправления, диспетчерской службы и технологической связи вдоль трассы ЛЭП. В 1982 г. в Англии была построена опытная комбинированная линия протяженностью 20 км, выполненная из энергетических проводов и четырехволоконного оптического кабеля, встроенного в фазный провод ЛЭП напряжением 400 кВ; при этом была применена цифровая система передачи на 30 каналов (рис. 3.27).

На рис. 3.28 приведена конструкция алюминиевого провода грозозащитного троса для ЛЭП высокого напряжения. Здесь канал для размещения волокон образуется шестью алюминиевыми сегментами

Известны также провода ЛЭП с большим числом волокон. Внешний вид и сечение такого провода приведены на рис. 3.29.

Подводные кабели предназначены для осуществления многоканальной связи на большие расстояния (до 10 000 км) и должны быть пригодны для прокладки на глубину до 7500 м. При этом используются в первую очередь такие достоинства ОК, как малые габариты и масса, а также большие длины регенерационных участков и высокая пропускная способность оптического тракта. В связи со специфическими особенностями прокладки и эксплуатации подводных магистралей к оптическим кабелям связи предъявляются следующие требования:

большая разрывная прочность, позволяющая выдерживать нагрузку при прокладке при подъеме кабеля во время его ремонта;

прочность на разрыв не менее 80 кН и способность выдерживать давление воды до 75 МПа;

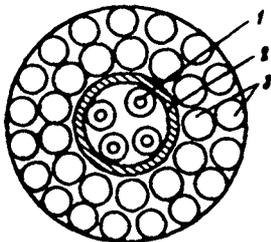


Рис. 3.27. Провод с оптическим кабелем для ЛЭП

1 — волокно; 2 — пластмассовая оболочка; 3 — сталеалюминиевые проволоки

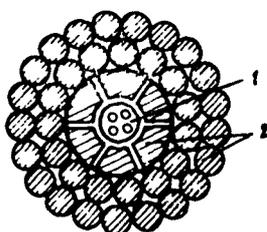


Рис. 3.28. Сложный провод с оптическим кабелем для ЛЭП:

1 — оптический кабель ОК-4; 2 — жилы из алюминиевого сплава

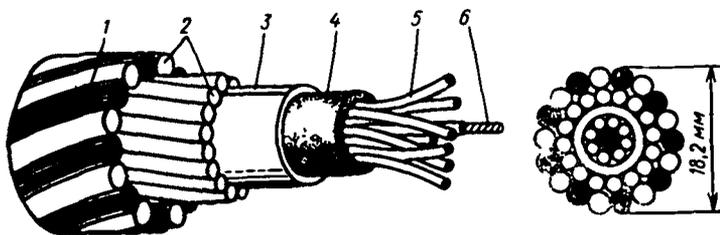


Рис. 329 Грозозащитный трос с оптическим кабелем для ЛЭП.
1, 2 — проволоки из сплава альдрей, 3 — алюмополиэтиленовая лента, 4 — оболочка из полистилена, 5 — оптические волокна, 6 — силовой элемент (сталь)

пригодность прокладки на больших глубинах и сопротивляемость давлению водного столба;

малое затухание, сводящее к минимуму число регенераторов, установка которых связана с определенными трудностями,

наличие медных проводников для электропитания регенераторов,

надежная герметичная защита оптических волокон от попадания влаги;

наличие большого числа каналов на любые требуемые расстояния;

стабильность оптических характеристик тракта при длительной эксплуатации

Кроме того, в зависимости от назначения и области применения оптических кабелей одни из них должны обладать плавучестью, а другие, наоборот, — избыточной массой для прокладки по дну

Конструкция подводного оптического кабеля приведена на рис 330, г. Основной элемент кабеля — оптический пластмассовый модуль (сердечник) — расположен в центре кабеля. В модуле размещены шесть оптических волокон (три цепи). Известны три разновидности конструкций модулей. В модуле рис 330, а волокна имеют плотную укладку и жестко связаны со всем

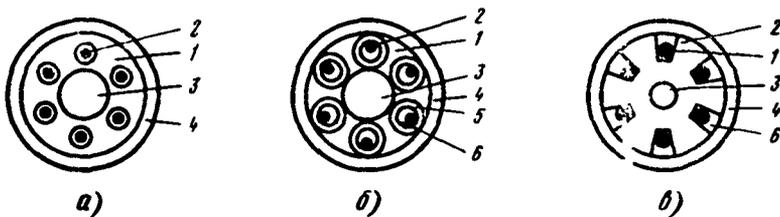
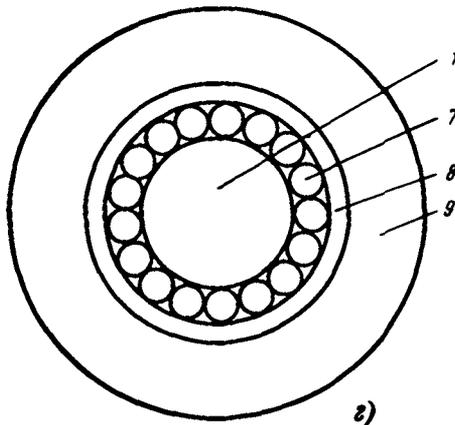


Рис 330 Конструкция модуля подводного оптического кабеля

а — с плотно уложенными волокнами, б — с волокнами, уложенными в трубки, в — с волокнами, уложенными в пазах профилированного сердечника, г — общий вид кабеля. 1 — сердечник на шесть волокон, 2 — волокно, 3 — силовой элемент, 4 — пластмассовая оболочка, 5 — пластмассовая трубка, 6 — композит, 7 — стальные проволоки, 8 — медная (алюминиевая) трубка, 9 — наружная полиэтиленовая оболочка



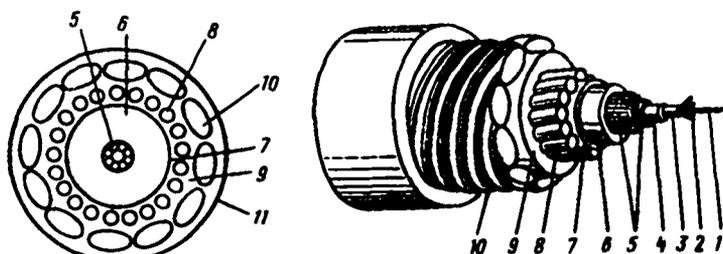


Рис 3.31. Глубоководный оптический кабель

1 — стальной сердечник; 2 — волокна; 3 — компаунд; 4 — медная трубка; 5 — стальные проволоки, 6, 7 — полиэтиленовая изоляция, 8, 10 — повив из стальных проволок; 9, 11 — полиэтиленовые оболочки

сердечником модуля В модуле рис. 3.30, б волокна свободно расположены в пластмассовых трубках, пространство внутри которых заполнено компаундом. В модуле рис. 3.30, в волокна размещены по геликонде в пазах пластмассового сердечника, в центре модуля находится силовой элемент из стальной проволоки, а сверху модуль заключен в тонкую нейлоновую или полиэтиленовую трубку.

Поверх оптического модуля наложен один или два повива высокопрочных стальных проволок, а затем медная или алюминиевая трубка, по которой передается ток питания усилителей (обратным проводом цепи питания служит морская вода). Снаружи имеется полиэтиленовая оболочка; диаметр кабеля 20 — 22 мм. Такой кабель без наружного броневоего покрова является основным для подводной прокладки. На подходах к берегам и на мелководных участках трассы применяют бронированные конструкции кабелей, имеющие снаружи один-два слоя круглопроволочной брони и полиэтиленовую оболочку.

На рис. 3.31 приведена конструкция глубоководного ОК. Диаметр кабеля 40 — 60 мм, масса 1 т/км при одиночной броне или 3 т/км при двойной броне.

Подводные оптические системы передачи рассчитаны на большую пропускную способность. По каждой паре волокон можно получить 4000 каналов при скорости передачи 280 Мбит/с. Всего шестиволоконный кабель обеспечивает 12 000 каналов.

Регенерационная аппаратура встроена в кабель и расположена в гибких цилиндрических баллонах, размещенных вдоль кабеля. Такие гибкие регенераторы, встроены в кабель, вызывают лишь незначительное его утолщение и не препятствуют непрерывной прокладке кабеля с судна. Срок службы подводных оптических магистралей предполагается в 25 лет.

Глава 4

Оптоэлектронные и оптические компоненты ВОСП

4.1. Источники оптического излучения

При построении ВОСП наряду с оптическими кабелями используют разнообразные оптоэлектронные и оптические компоненты: источники и приемники оптического излучения, а также построенные на их основе оптоэлектронные модули, оптические соединители, разветвители, изоляторы и др. Параметры и характеристики этих компонентов во многом определяют технико-экономические показатели системы передачи, и поэтому их рациональный выбор является очень важной задачей.

Следует отметить, что пока отечественная промышленность серийно выпускает ограниченную по количеству и разнообразию номенклатуру оптоэлектронных и оптических элементов и устройств, предназначенных для внутризонных и особенно магистральных ВОСП. Поэтому наряду с отечественными приводятся сведения о зарубежных оптоэлектронных и оптических компонентах, а также кратко рассматриваются принципы их действия и конструкции.

В качестве источников оптического излучения в ВОСП применяют полупроводниковые лазерные диоды и светодиоды, построенные главным образом на основе двойной гетероструктуры из материалов с прямыми переходами. Основу работы полупроводниковых источников излучения составляет инжекционная электролюминесценция, представляющая собой излучательную рекомбинацию инжектированных в активную область прибора носителей заряда.

Известно, что для генерации фотонов в полупроводнике необходимо наличие электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Создание пар носителей заряда в возбужденном состоянии (электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне) возможно различными способами, но наиболее практичным и эффективным является метод инжекции носителей заряда через $p-n$ -переход, используемый как в светодиодах, так и лазерных диодах.

Кроме излучательной рекомбинации в полупроводниковых материалах существуют и другие механизмы рекомбинации, не связанные с излучением: рекомбинация на дефектах или примесях, ударная рекомбинация и др. Безызлучательные рекомбинации сопровождаются в основном рассеиванием энергии в виде тепла. В полупроводниковых материалах, используемых для создания оптических излучателей, излучательная рекомбинация должна доминировать по сравнению с другими видами рекомбинации. Это зависит от характера переходов электронов из одной зоны в другую: прямой или непрямой (рис. 4.1). В полупроводниковых материалах, где такие переходы имеют непрямой характер, требуется изменение не только энергии электрона, но и его импульса. Из-за этого вероятность излучательной рекомбинации в полупроводниковых материалах с непрямыми межзонными переходами (непрямозонные полупроводники) мала, а сама излучательная рекомбинация неэффективна. По этой причине кремний Si и германий Ge, являющиеся непрямозонными полупроводниками, не подходят для производства источников оптического излучения. Напротив, в полупроводниковых материалах с прямыми межзонными переходами (прямозонные полупроводники) вероятность излучательной рекомбинации велика, а сама рекомбинация протекает быстро с излучением фотона, длина волны, мкм, которого определяется соотношением $\lambda \approx 1,24/E_g$, где E_g — ширина запрещенной зоны, эВ.

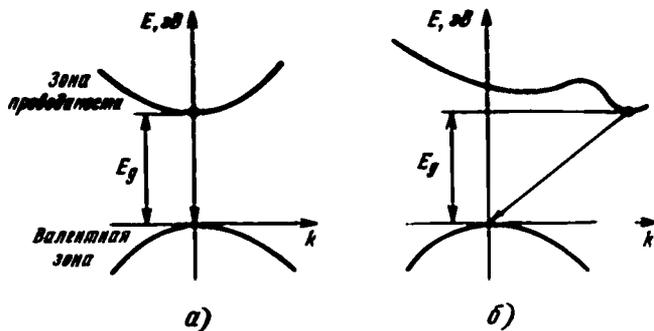
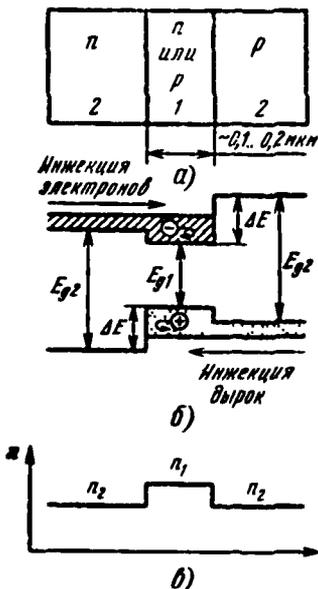


Рис. 4.1. Энергетические диаграммы с прямым (а) и непрямым (б) переходами (k — волновой вектор, определяющий импульс электрона. Стрелкой показаны переходы из зоны проводимости в валентную зону)

Среди полупроводниковых материалов, обладающих свойствами прямого межзонного перехода, наилучшими характеристиками обладают арсенид галлия GaAs и фосфид индия InP, а также соединения на их основе

Как уже отмечалось, полупроводниковые лазерные диоды и светодиоды строятся главным образом на основе двойной гетероструктуры, представляющей собой в упрощенном виде трехслойную структуру, показанную на рис. 4.2 В такой структуре излучательная рекомбинация происходит в узком активном слое 1, расположенном между



двумя ограничивающими (пассивными) слоями 2, которые формируются из полупроводниковых материалов с большей шириной запрещенной зоны. Граница раздела между двумя слоями полупроводниковых материалов с различными значениями E_g называется гетеропереходом.

Отличительной особенностью гетероперехода является односторонняя инжекция, обусловленная потенциальным барьером ΔE из-за скачка потенциала на границе раздела. Поэтому при приложении к двойной гетероструктуре прямого смещения происходит инжекция электронов и дырок из n - и p -областей в активный слой, а инжектированные носители заряда удерживаются в нем за счет двух потенциальных барьеров, связанных с гетеропереходами

Рис. 4.2 Двойная гетероструктура:

а — структура; б — упрощенная энергетическая диаграмма при прямом смещении; в — распределение показателя преломления n по слоям структуры.

1 — активный слой; 2 — ограничивающие (пассивные) слои

Другой особенностью двойной гетероструктуры является резкое различие оптических свойств слоев. Пассивные слои имеют более низкий показатель преломления по сравнению с активным слоем. Поэтому рекомбинационное излучение, рожденное в активном слое, может распространяться вдоль него, испытывая многократные отражения, как в диэлектрическом волноводе.

Таким образом, двойная гетероструктура обеспечивает в силу указанных особенностей высокую концентрацию в малом объеме активного слоя как носителей заряда, так и оптического излучения, проявляя тем самым высокую эффективность

Выбор конкретных полупроводниковых материалов для формирования двойной гетероструктуры зависит от требуемого значения длины волны оптического излучения. Согласно вышеприведенному соотношению длина волны излучения или энергия излучаемого фотона зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника, из которого формируется активный слой. Поэтому, используя полупроводниковые материалы с различной шириной запрещенной зоны, можно получать источники с различной длиной волны оптического излучения

Для работы в диапазоне 0,8 - 0,9 мкм используют гетероструктуры на трехкомпонентном соединении вида $Ga_{1-x}Al_xAs$. Это соединение получается путем замещения в кристалле GaAs части атомов галлия алюминием, на что указывает в структуре формулы соединения величина x , представляющая собой молярную долю алюминия в материале полупроводника. С возрастанием параметра x ширина запрещенной зоны увеличивается от 1,42 эВ для чистого GaAs ($x=0$) до 2,02 эВ для $Ga_{0,62}Al_{0,38}As$ ($x=0,38$). Обычно формирование активного слоя производят при $0 \leq x \leq 0,1$, а пассивных слоев при $0,3 \leq x \leq 0,4$. Показатель преломления трехкомпонентного соединения

$Ga_{1-x}Al_xAs$ с увеличением x уменьшается почти по линейному закону от 3,6 в GaAs до 3,0 в AlAs при длине волны 0,9 мкм, причем вплоть до значения $x=0,38$ энергетическая диаграмма остается прямозонной

Для полупроводниковых источников излучения, работающих в диапазоне 1,1–1,7 мкм, в качестве материала для создания активного слоя применяется четырехкомпонентное соединение $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, из которого выращивается структура на подложке InP. Данный диапазон длин волн особенно важен, так как оптические кабели на основе кварцевых волокон на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм имеют минимумы потерь. Для получения длины волны излучения 1,3 мкм в качестве активного слоя используют четырехкомпонентное соединение $Ga_{0,29}In_{0,71}As_{0,61}P_{0,39}$, а для волны 1,55 мкм — $Ga_{0,39}In_{0,61}As_{0,81}P_{0,19}$. Формирование пассивных слоев осуществляется из фосфида индия или четырехкомпонентного соединения, у которого ширина запрещенной зоны составляет среднюю величину между шириной запрещенной зоны InP и материала активного слоя.

Материалы GaAs и InP в настоящее время являются базовыми в оптоэлектронике и используются при создании не только полупроводниковых излучателей, но и фотоприемников. Кроме этих материалов для создания полупроводниковых излучателей могут использоваться и другие, краткие сведения о которых даны в табл. 4.1

Таблица 4.1

Активный материал	Подложка	Диапазон возможных значений E_g , эВ		Возможные значения излучаемых волн, мкм	
GaAlAs	GaAs	2,02	1,42	0,61	0,87
GaInAsP	InP	1,34	0,73	0,93	1,7
	GaAs	1,93	1,42	0,64	0,87
GaInSbP	InP	1,34	1,09	0,93	1,4
	GaSb	0,69	0,55	1,8	2,25
GaInSbAs	InAs	0,7	0,35	1,77	3,54
	GaSb	0,69	0,29	1,8	4,28
AlInSbAs	InAs	1,61	0,35	0,77	3,54
AlGaSbAs	GaSb	1,0	0,69	1,24	1,8

Конструкции полупроводниковых лазерных диодов и светодиодов (СД), применяемых в ВОСП, весьма разнообразны. Конструкции СД выбирают с таким расчетом, чтобы уменьшить собственное самопоглощение излучения, обеспечить режим работы при высокой плотности тока инжекции (накачки) и увеличить эффективность ввода излучения в волокно. Для повышения эффективности ввода используют микролинзы как формируемые непосредственно на поверхности прибора, так и внешние. В настоящее время получили распространение две основные модификации СД: поверхностные и торцевые. В поверхностных СД излучение выводится в направлении, перпендикулярном плоскости активного слоя, а в торцевых из активного слоя — в параллельной ему плоскости. Схематическое изображение конструкций СД обоих типов приведено на рис. 4.3. Для улучшения отвода тепла от активного слоя при высокой плотности тока накачки применяют теплоотводы. Вывод излучения в СД поверхностного типа на арсениде галлия осуществляют через круглое отверстие, вытравленное в подложке. В это отверстие вставляют оптическое волокно и закрепляют его с помощью эпоксидной смолы. Такую конструкцию

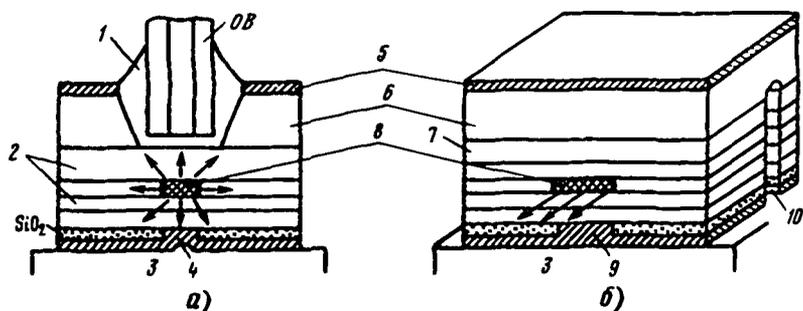


Рис. 4.3. Конструкция светодиодов:

a — поверхностного типа; *б* — торцевого типа
 1 — эпоксидная смола, 2 — пассивные слои, 3 — теплоотвод, 4 — омический контакт диаметром ~50 мкм; 5 — контакт (металл); 6 — подложка, 7 — эпитаксиальный слой, 8 — активная область, 9 — омический контакт шириной ~65 мкм, 10 — щель

светодиода называют диодом Барраса. Известны также конструкции поверхностных СД с выводом излучения непосредственно через подложку. Такие конструкции применяются в СД на четырехкомпонентном соединении GaInAsP. В этом случае подложка из InP является прозрачным окном

В торцевых СД с двойной гетероструктурой вывод излучения активного слоя осуществляют с торца, как и в лазерных диодах. Благодаря полному внутреннему отражению оптическое излучение распространяется вдоль перехода. С помощью полосковой конструкции нижнего омического контакта, а также щели на задней части активного слоя активная область ограничена, что позволяет избежать лазерной генерации. Так как генерируемое излучение при выводе наружу проходит через активный слой, то имеет место самопоглощение излучения в этом слое. Для уменьшения самопоглощения активный слой выполняют очень тонким (0,03 — 0,1 мкм). В результате излучение распространяется главным образом в ограничивающем слое, который благодаря большей ширине запрещенной зоны имеет небольшие потери на поглощение

Излучение светодиодов возникает в результате спонтанной излучательной рекомбинации носителей заряда и поэтому является некогерентным, а следовательно, относительно широкополосным и слабо направленным (для поверхностных СД диаграмма направленности является ламбертовской)

Особо следует выделить суперлюминесцентные светодиоды. В этих диодах помимо спонтанной рекомбинации с излучением используется процесс индуцированной рекомбинации с излучением, выходное излучение является усиленным в активной среде. Суперлюминесцентные светодиоды представляют собой торцевые светодиоды, работающие при таких высоких плотностях тока инжекции, что в материале активного слоя начинает наблюдаться инверсная населенность энергетических уровней.

Принципиальным отличием лазерного диода от светодиода является наличие в первом встроенного оптического резонатора, что позволяет при условии превышения током инжекции некоторого порогового значения получить режим индуцированного излучения, которое характеризуется высокой степенью когерентности. Наиболее часто в качестве оптического резонатора в полупроводниковых лазерных диодах используют: плоский резонатор Фабри—Перо и его модификации, включая составные и внешние резонаторы, резонаторы с распределенной обратной связью (РОС-резонатор) и с распределенным брэгговским отражателем (РБО-резонатор). Плоский резонатор образуется обычно параллельно сколотыми торцами полупроводника, а РОС- и РБО-резонаторы — путем периодической пространственной модуляции параметров структуры, влияющих на условия распространения излучения. При совмещении периодической структуры с активной областью получают РОС-лазерный диод, а при размещении периодической структуры за пределами

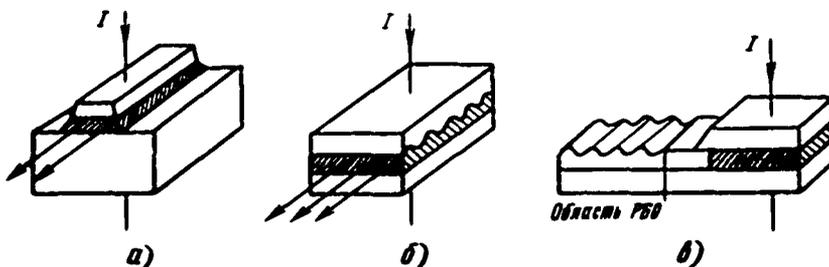


Рис. 44 Конструкции активных излучающих структур лазерных диодов: а — полосковая мезаструктура лазерного диода с плоским резонатором, б — РОС-лазерный диод, в — РВО лазерный диод

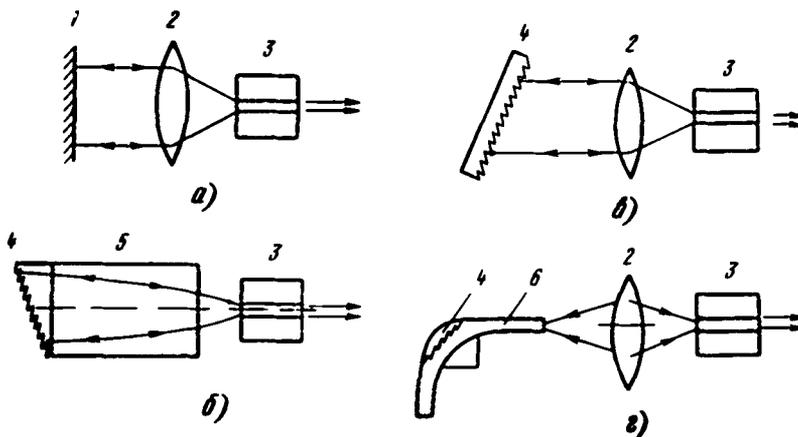


Рис. 45 Лазерные диоды с внешними резонаторами

а — объемный с зеркалом, б — с дифракционной решеткой на градиентной линзе, в — объемный с дифракционной решеткой, г — волоконный с дифракционной решеткой на поверхности ОВ
1 — зеркало, 2 — микрообъектив, 3 — лазерный диод, 4 — дифракционная решетка, 5 — градиентная линза 6 — оптическое волокно

активной области — РВО-лазерный диод. На рис. 44 показаны три упрощенные конструкции активных излучающих структур лазерных диодов с плоским резонатором полоскового типа, с распределенной обратной связью и распределенным брэгговским отражателем. Некоторые конструкции лазерных диодов с внешними резонаторами показаны на рис. 45.

Преимуществами РОС и РВО-лазерных диодов по сравнению с обычным лазерным диодом с резонатором Фабри—Перо являются уменьшение зависимости длины волны излучения от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и одночастотности излучения, практически 100-процентная глубина модуляции. Так, если в лазерном диоде с резонатором Фабри—Перо температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ порядка $0,5 \text{ нм}^\circ\text{C}$, то для РОС-лазерного диода он равен $0,07 \dots 0,09 \text{ нм}^\circ\text{C}$. Кроме того, РОС- и РВО-структуры позволяют реализовать интегрально оптические схемы. Основным их недостатком является сложная технология изготовления.

Полупроводниковые излучатели в общем случае определяют комплекс параметров и характеристик, включая габаритные и присоединительные размеры. Однако с точки зрения их применения в качестве компонентов ВОСП важное значение имеет ограниченный набор параметров и характери-

стик, которые чаще всего и приводятся в паспортных данных конкретных приборов. В случаях же, когда этот ограниченный набор оказывается недостаточным, необходимо проведение дополнительных исследований и измерений.

Наиболее важными для применения в ВОСП параметрами являются: средняя мощность излучения при работе в непрерывном режиме, длина волны излучения, ширина излучаемого спектра, время нарастания и спада импульса излучения при импульсном возбуждении ток накачки, падение напряжения на диоде и наработка на отказ.

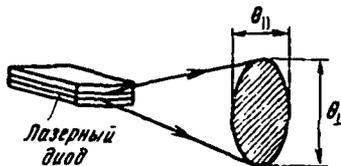


Рис 4.6 Выходной пучок излучения лазерного диода

Кроме того, для лазерных диодов и торцевых светодиодов, обладающих узкой диаграммой направленности, существенное значение имеют углы расходимости по уровню половинной мощности. Эти углы обычно определяют по направлению излучения в параллельной и перпендикулярной переходу (активной области) плоскостях и обозначают соответственно θ_{\parallel} и θ_{\perp} (рис. 4.6). Оба угла характеризуют поле излучения в дальней зоне и обычно $\theta_{\parallel} = 10 \dots 30^\circ$ и $\theta_{\perp} = 30 \dots 60^\circ$.

Средняя мощность излучения при работе излучателя в непрерывном режиме определяет полную (интегральную) мощность, излучаемую поверхностью активной области прибора в направлении вывода излучения. Эту мощность часто называют просто мощностью излучения, причем в ряде случаев ее указывают с учетом оптического согласования, приводя параметры такого согласования.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности (спектральной характеристики), а ширину излучаемого спектра $\Delta\lambda_{0,5}$ — как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной (рис 4.7). Огибающая спектрального распределения излучения светодиода имеет примерно форму гауссовской кривой с $\Delta\lambda_{0,5} = 20 \dots 50$ нм. Для лазерных диодов с резонатором Фабри—Перо ширина спектра значительно уже (порядка $1 \dots 4$ нм) и еще меньше для РОС- и РБО-лазерных диодов, у которых в зависимости от конструкции она может составлять $0,1 \dots 0,3$ нм. Минимальная ширина спектра достигается в лазерных диодах с внешними резонаторами, у которых она в зависимости от типа резонатора лежит в пределах $1 \dots 1500$ мГц

Для высокоскоростных ВОСП важное значение имеют динамические свойства лазерных диодов, которые проявляются в зависимости спектральной характеристики от скорости передачи при непосредственной модуляции мощ-

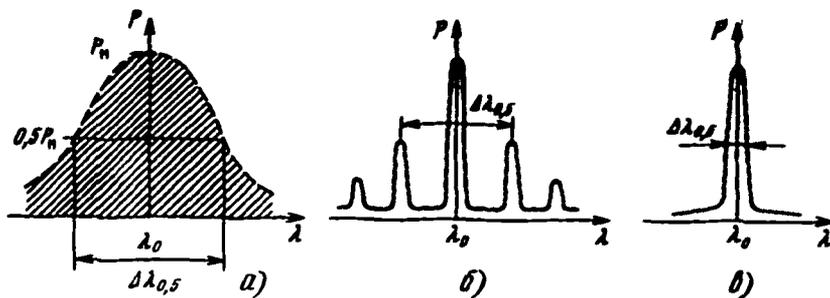


Рис. 4.7. Спектральное распределение мощности:

а — светодиода; б — многомодового лазерного диода; в — одномодового лазерного диода

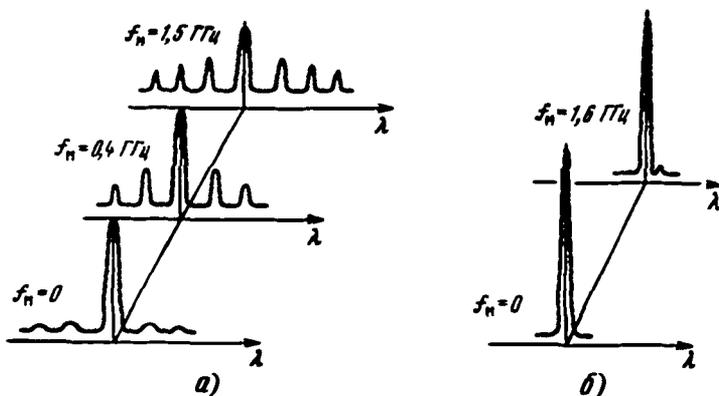


Рис. 48. Спектр излучения
 а — лазерного диода с резонатором Фабри—Перо, б — РБО-лазерного диода

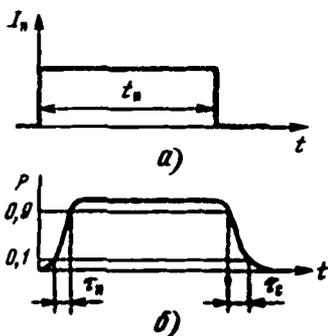


Рис 49 Временные диаграммы импульсной модуляции
 а — модулирующий импульс тока, б — оптический импульс

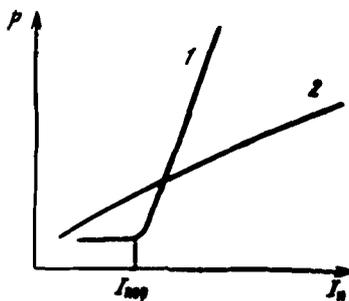


Рис 410 Ватт амперные характеристики
 1 — лазерного диода, 2 — светодиода

ности излучения путем изменения тока накачки I одномодового лазерного диода с резонатором Фабри—Перо увеличение скорости передачи сопровождается изменением модового состава, что характеризуется динамическим расширением спектра до 10 нм при модуляции с частотой f_m порядка 1–2 ГГц (рис 48). Для РОС и РБО-лазерных диодов при модуляции в диапазоне 0,25–2 ГГц имеет место лишь незначительный сдвиг λ_0 (порядка 0,2 нм) при сохранении высокой степени подавления побочных мод. Поэтому эти лазерные диоды часто называют динамически одномодовыми.

Быстродействие источников излучения оценивается временем нарастания τ_n и временем спада τ_c мощности излучения при модуляции импульсами тока накачки прямоугольной формы достаточной длительности ($t_n \gg \tau_n$). Для оценки τ_n и τ_c обычно используют уровни 0,1 и 0,9 от установившегося значения мощности (рис 49). Часто быстродействие определяется максимальной частотой модуляции. Для светодиодов эта частота может достигать 200 МГц, а у лазерных диодов — значительно больше (нескольких гигагерц). Ограничение частоты модуляции светодиодов связано со временем жизни неосновных носителей, а лазерных диодов — с корреляцией между концентрацией инжектируемых носителей и потоком фотонов, возникающих вследствие их рекомбинации.

К параметрам, определяющим статический режим работы полупроводникового излучательного диода, относят падение напряжения на диоде и ток накачки при прямом смещении. Кроме этих параметров статический режим работы характеризуется ватт-амперной характеристикой, примерный вид которой для лазерного диода и светодиода показан на рис. 4.10. На ватт-амперной характеристике лазерного диода можно выделить точку излома, которая определяется пороговым током накачки $I_{пор}$. При токах накачки выше порогового лазерный диод работает в режиме индуцированного излучения и мощность его очень быстро растет с увеличением тока накачки. Если ток накачки меньше $I_{пор}$, то прибор работает в режиме спонтанного излучения и излучаемая мощность мала. Одновременно резко уменьшается быстрдействие и существенно расширяется ширина излучаемого спектра. Поэтому лазерные диоды в динамическом режиме работы требуют начального смещения постоянным током, примерно равным пороговому току. Наклон ветви ватт-амперной характеристики лазерного диода, расположенной правее $I_{пор}$, характеризует дифференциальную квантовую эффективность $\eta_d = dP/dI_n$, которая зависит от конструкции прибора и его температуры. Типичные значения дифференциальной квантовой эффективности лазерных диодов составляют 0,1–0,2 мВт/мА, а пороговый ток лежит в пределах 10–100 мА.

Для лазерных диодов характерна температурная зависимость порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности. С ростом температуры пороговый ток увеличивается, а дифференциальная квантовая эффективность уменьшается. Изменение температуры приводит также к изменению длины волны излучения. Наибольшей температурной нестабильностью обладают лазерные диоды с резонатором Фабри–Перо. Лазерные диоды с РОС и РБО-резонаторами более термостабильны. Для уменьшения температурных влияний применяют специальные меры, например используют теплоотводы с элементом Пельтье. Параметры и характеристики светодиодов имеют достаточно высокую температурную стабильность, что делает их более простыми в эксплуатации.

Таблица 4.2

Параметр	АЛ 132А ЗЛ 132А	ЗЛ 135А	ИЛПН-110М	ЛМ2-850
Мощность излучения, мВт	Не менее 0,01	Не менее 0,15	Не менее 0,1	Не более 0,5
Длина волны излучения, мкм	1,260	0,82... 0,9	0,83±0,025	0,83±0,025
Ширина спектра излучения, нм	80	50	15	40
Время нарастания (спада), нс	Не более 20	Не более 20	—	—
Частота модуляции, МГц	—	—	50	100
Ток накачки, мА	100	100	80	300
Падение напряжения на диоде, В	Не более 2,0	Не более 2,0	Не более 2,5	—
Наработка на отказ, ч	—	—	10 ⁵ (при 25° С)	10 ⁵ (при 25° С)

Примечания. 1. Мощность излучения для АЛ 132А измеряется на выходе ОВ длиной 1 м, диаметром сердечника 0,2 мм и затуханием до 50 дБ/км.

2. Мощность излучения для ЗЛ 135А измеряется на выходе ОВ длиной до 10 м, диаметром сердечника 0,2 мм и числовой апертурой 0,27–0,3.

3. Мощность излучения для ИЛПН 110М измеряется в выходном торце ОВ с числовой апертурой 0,2. Для ЛМ2-850 числовая апертура равна 0,11.

4. Светодиоды ИЛПН 110М и ЛМ2 850 являются торцевыми суперлюминесцентными.

Надежность полупроводниковых излучателей определяется наработкой на отказ или интенсивностью отказов. Лазерные диоды, созданные в начале 80-х годов, обладали существенно меньшей надежностью по сравнению со светодиодами. Однако в последнее время благодаря совершенствованию конструкций и технологии изготовления ее удалось значительно повысить и довести до приемлемой величины.

Сведения о параметрах светодиодов и лазерных диодах, серийно выпускаемых отечественной промышленностью и предназначенных для применения в ВОСП различного назначения, приведены соответственно в табл. 4.2 и 4.3. Краткие сведения о некоторых зарубежных лазерных диодах приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.3

Параметр	ИЛПН-109М	ЛМ1-850	ИЛПН-202	ИЛПН-203	ИЛПН-204	ИЛПН-206
Мощность излучения, мВт	Не менее 3	Номинальная 1	Не менее 1	Не менее 3,5	Не менее 1	Не менее 1
Длина волны излучения, мкм	$0,83 \pm 0,025$	Максимальная 2	1,2 1,35	0,81 0,88	0,81 0,88	1,22 1,33
Ширина спектра излучения, нм, не более	2	2	5	3	—	10
Время нарастания, нс	—	—	—	2	—	—
Частота модуляции, МГц, не менее	250	250	—	—	—	—
Ток накачки, мА, не более	120	160	200	120	100	—
Пороговый ток, мА	—	—	—	30 85	—	—
Падение напряжения на диоде, В	Не более 2,5	—	Не более 3,0	1,5 2,7	1,6 2,4	Не более 2,5
Наработка на отказ, ч	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^4	10^4	10^4	10^4

Таблица 4.4

Фирма-изготовитель	Марка	Активный материал	Длина волны излучения, нм		Ширина спектра излучения, нм	Мощность излучения, мВт	Пороговый ток, мА
Ortel Corp	SL-620	GaAlAs	820	860	<0,01	2,5	20
	SL-315	GaAlAs	820	860	1,50	10	25
	LW 620	InGaAsP	1300		3,00	3	25
Siemens	SFH 408	GaAlAs	840	880	<4,00	0,2	125
	SFH 419	GaAlAs	840	880	<4,00	0,5	125

Фирма-изготовитель	Марка	Активный материал	Длина волны излучения, нм	Ширина спектра излучения, нм	Мощность излучения, МВт	Пороговый ток, мА
Mitsubishi	FU-22LD	GaAlAs	850	3,00	3,5 1,75	30 20
	FU-31LD	InGaAsP	1300	<1,00		
NEC Corp.	NDL5003	InGaAsP	1280...1320	4,00	8 ($I_n = 50$ мА) 1	20 30
	NDL5050A	InGaAsP	1500...1600	4,00		
AT & T	201A	GaAlAs	820	—	2 ($I_n = 175$ мА)	100
Ligtwave Technologies	209F	InGaAsP	1300	2,00			0,2
	209D	InGaAsP	1300	2,00	0,3	70
Lasertron	QLM1500 SM	InGaAsP	1500...1560	3,20	0,5	30
	QLM1550 MM	InGaAsP	1500...1560	4,80	1,0	30

4.2. Фотоприемники

Фотоприемники обеспечивают преобразование оптического излучения в электрический ток или напряжение, что позволяет осуществлять обработку сигналов (усиление, фильтрацию и т. д.) электронными схемами. Основными требованиями, предъявляемыми к фотоприемникам ВОСП, являются: высокая чувствительность на рабочей длине волны, малая инерционность, низкий уровень собственных шумов, стабильность параметров, небольшие размеры, высокая надежность и низкое напряжение питания. Перечисленным требованиям в наиболее полной мере удовлетворяют *p-i-n* и лавинные фотодиоды (ЛФД), которые в основном и применяются в ВОСП.

В основе работы фотодиодов лежит явление внутреннего фотоэффекта в полупроводниковом материале, связанное с поглощением фотона, энергия которого больше или равна ширине запрещенной зоны, и сопровождающееся переходом электрона из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочной пары). Эффективная регистрация генерированных в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда конструкцией с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом.

Схематическое изображение структур *p-i-n*-фотодиода и ЛФД, их включение и распределение в этих структурах электрического поля показаны на рис. 4.11. Для *p-i-n*-фотодиода характерно наличие *i*-области (слаболегированный полупроводник *n*-типа) между тонкими слоями полупроводника *p*⁺- и *n*⁺-типа (знак + означает сильное легирование). Поэтому при обратном смещении *p-n*-перехода образуется широкая обедненная область, в которой перенос носителей заряда осуществляется под действием электрического поля (дрейфовое движение). Наличие электрического поля в *i*-области, где в основном поглощаются фотоны падающего излучения и генерируются электронно-дырочные пары, обеспечивает быстрое разделение носи-

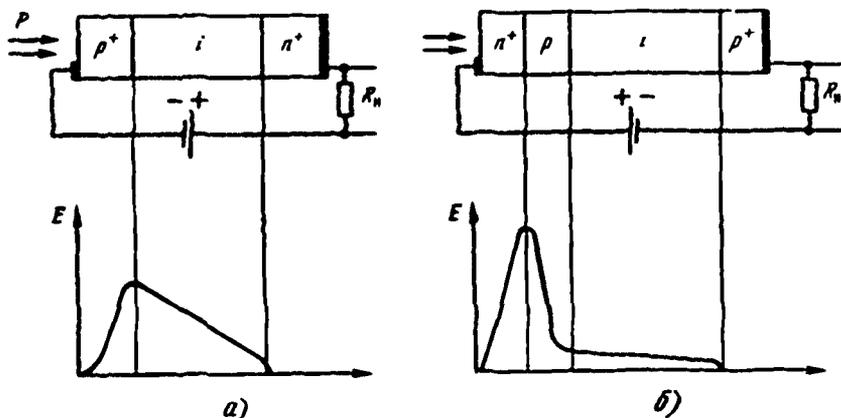


Рис. 4.11. Структура, включение и распределение электрического поля:
 а — $p-i-n$ -фотодиода. б — лавинного фотодиода

телей заряда, а следовательно, высокое быстродействие процесса преобразования оптического излучения в электрический ток. Так как обедненная область достаточно широка, то достигается и высокая эффективность преобразования поглощаемой оптической мощности в электрический ток. Эффективность (квантовый выход) такого преобразования равна почти 100% для фотонов, поглощаемых в i -слое. Однако часть падающего излучения отражается от фоточувствительной поверхности из-за скачка показателя преломления на границе между этой поверхностью и средой, из которой поступает излучение (обычно воздух). Поэтому для уменьшения отражаемой мощности, фоточувствительную поверхность покрывают слоем материала, показатель преломления которого равен среднегеометрическому из показателя преломления полупроводника и воздуха. Этот слой называют антиотражающим покрытием, и его толщина равна четверти рабочей длины волны.

При рассмотрении процесса работы $p-i-n$ -фотодиода следует иметь в виду, что часть фотонов падающего излучения поглощается в p^+ - и n^+ -слоях и возбуждает там носители заряда, которые движутся за счет диффузии. Скорость диффузионного движения значительно (примерно на три порядка) ниже скорости дрейфа носителей заряда в i -области. Поэтому диффузионный ток, обусловленный поглощением части излучения за пределами обедненной области, ухудшает быстродействие, обуславливая появление так называемых диффузионных «хвостов» на импульсной характеристике. Так как часть носителей, возбужденных в p^+ - и n^+ -слоях, рекомбинирует, то квантовый выход уменьшается. Поэтому для обеспечения высоких показателей быстродействия и квантового выхода при разработке конструкций $p-i-n$ -фотодиода стремятся p^+ -слой сделать как можно тоньше, а толщину i -слоя выбирают большей длины поглощения света, которая зависит от материала полупроводника и длины волны излучения.

Каждая электронно-дырочная пара, генерированная при поглощении фотона и разделенная $p-n$ -переходом, вызывает прохождение через внешнюю нагрузку R_n электрического заряда, равного заряду электрона. Следовательно, при падении на фоточувствительную поверхность фотодиода оптического излучения мощностью P , Вт, через нагрузку будет протекать ток, называемый фототоком и равный $I_\phi = PS_i$, где S_i — токовая чувствительность фотодиода, А/Вт.

Токовая чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Характер этой зависимости определяется спектральной характеристикой квантового выхода, которая обычно имеет вид плавной кривой с более

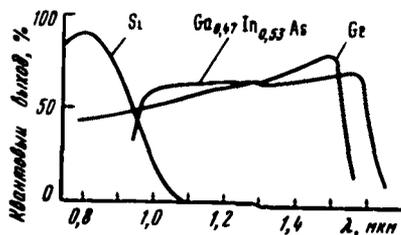


Рис 4 12 Спектральная характеристика квантового выхода

тельно, желательно увеличить фототок перед его усилением в электронном усилителе, повысив тем самым чувствительность

Усиление первичного фототока обеспечивается механизмом лавинного умножения, который используется в схематически показанной на рис 4 11, б $p^+-p-i-p^+$ -структуре ЛФД. Профиль распределения легирующих примесей в ЛФД подобран таким образом, что при сравнительно большом обратном смещении в узком слое i -области создается сильное электрическое поле, в котором носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации и лавинного умножения первичных носителей заряда. Лавинное умножение (усиление) первичного фототока является случайным процессом, и поэтому оно вносит дополнительные шумы. Усиление ЛФД характеризуется средней величиной коэффициента лавинного умножения (коэффициентом умножения M), который показывает, во сколько раз выходной фототок лавинного фотодиода превышает первичный фототок фотодиода, протекающий при отсутствии в нем эффекта лавинного умножения. Коэффициент умножения составляет несколько десятков, так что токовая чувствительность лавинных фотодиодов значительно превышает токовую чувствительность $p-i-n$ -фотодиодов. Обычно величина токовой чувствительности лавинных фотодиодов составляет 20–60 А/Вт. Величина коэффициента умножения приближенно может быть определена по эмпирической формуле $M = 1 / [1 - (U_{см} / U_{п})^{\beta}]$, где $U_{см}$ — напряжение внешнего смещения; $U_{п}$ — напряжение лавинного пробоя, $\beta = 1,5–9$ — в зависимости от материала и конструкции.

Конструкции $p-i-n$ - и лавинных фотодиодов отличаются большим разнообразием. На рис 4 13 показаны сечения двух конструкций: кремниевого $p-i-n$ -фотодиода и германиевого ЛФД p^+-n структуры. Для улучшения характеристик фотодиодов по краям вокруг перехода формируется зона с бо-

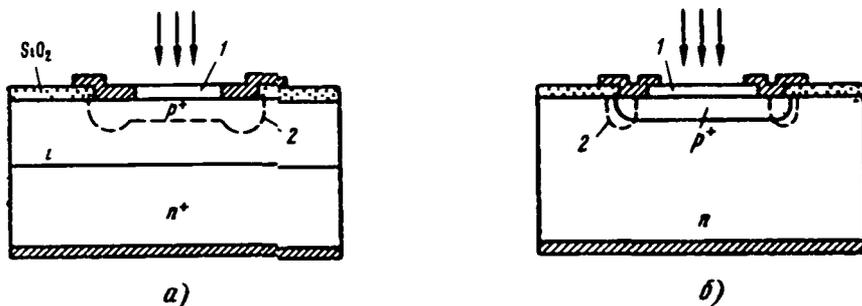


Рис 4 13 Конструкции фотодиодов:

а — $p-i-n$ кремниевого, б — лавинного германиевого;
1 — антиотражающее покрытие, 2 — охранный кольцо
(контактные области заштрихованы)

лее глубоким проникновением p^+ -слоя (охранное кольцо). Для $p-i-n$ -фотодиода охранное кольцо способствует увеличению пробивного напряжения и уменьшению токов поверхностных утечек, а для ЛФД обеспечивает еще и равномерный лавинный режим по всей площади диода

Как функциональные элементы $p-i-n$ -фотодиод и ЛФД могут быть представлены в виде одной и той же эквивалентной схемы, показанной на рис 4 14 Здесь генератор тока, величина которого равна $P \cdot S_i$, отражает

преобразование оптического излучения в фототок Конденсатор C_d представляет барьерную емкость обратносмещенного перехода, резистор R_n — последовательное сопротивление (несколько Ом), R_d — дифференциальное сопротивление обратносмещенного диода Обычно R_d настолько велико, что во всех практических случаях его можно исключить из рассмотрения. Поэтому, учитывая также малость R_n , используют упрощенную эквивалентную схему в виде источника тока, шунтируемого емкостью C_d .

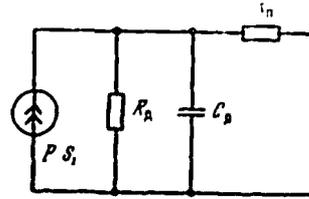


Рис 4 14 Эквивалентная схема $p-i-n$ - и лавинного фотодиодов

Наиболее важными параметрами и характеристиками фотодиодов как фотоприемников, определяющими их применение в ВОСП, являются токовая чувствительность, квантовый выход, коэффициент умножения (для ЛФД), темновой ток, емкость фотодиода, предельная частота (или время нарастания и время спада), порог чувствительности и область спектральной чувствительности или спектральная характеристика чувствительности (квантового выхода) Определенное значение имеют также такие параметры, как рабочее напряжение смещения, предельное (пробивное) напряжение, размеры фоточувствительной площадки и др

Понятие о токовой чувствительности уже рассматривалось По определению, она представляет собой отношение фототока к мощности оптического излучения, падающего на фоточувствительную поверхность фотоприемника. Различают интегральную и монохроматическую токовую чувствительности. Под интегральной токовой чувствительностью понимают чувствительность фотоприемника к излучению заданного (обычно весьма широкого) спектрального состава Монохроматическая токовая чувствительность определяет чувствительность фотоприемника к монохроматическому излучению на определенной длине волны Так как излучение применяемых в ВОСП светодиодов и особенно лазерных диодов является близким к монохроматическому, то ясно, что для рассматриваемых фотоприемников представляет интерес только монохроматическая токовая чувствительность Обычно она и указывается в паспортных данных фотодиодов, используемых в ВОСП, для области спектра максимальной чувствительности, где, как правило, должен работать фотодиод Квантовый выход фотодиода однозначно связан с токовой чувствительностью следующей зависимостью $\eta \approx 1,24 S_i / \lambda$, где λ — длина волны, мкм

В отсутствие падающего на фотодиод излучения при его обратном смещении через нагрузку протекает весьма небольшой ток, который называется темновым Величина этого тока зависит от материала полупроводника, температуры и конструкции прибора Наиболее значителен темновой ток в фотодиодах из германия, составляющий обычно доли миллиампера и даже единицы миллиампер В фотодиодах из других материалов темновой ток намного меньше Темновой ток лавинных фотодиодов состоит из двух составляющих, одна из которых проходит внутри объема прибора через область лавинного умножения и поэтому усиливается, а другая вызвана поверхностными токами утечки

Инерционные свойства фотодиодов оценивают по значению предельной частоты или времени нарастания и спада Предельная частота определяется как частота гармонической модуляции падающего на фотодиод модулированного по интенсивности излучения, при которой чувствительность умень-

шается до 0,707 чувствительности при немодулированном излучении. Время спада и время нарастания определяют по интервалам времени переднего и заднего фронта между уровнями 0,1 и 0,9 переходной характеристики, представляющей собой отклик на воздействие прямоугольного импульса излучения большой длительности. У лавинных фотодиодов увеличение коэффициента умножения сопровождается уменьшением быстродействия. Поэтому их характеристикой является произведение коэффициента умножения и полосы пропускания (численно полоса пропускания равна предельной частоте), которое часто называют добротностью фотоприемника. Для лавинных фотодиодов, используемых в высокоскоростных ВОСП, добротность лежит в пределах 10...100 ГГц.

Шумовые свойства фотоприемников определяются порогом чувствительности, током шума и напряжением шума, а также связанными с ними параметрами: удельным порогом чувствительности, порогом чувствительности в единичной полосе частот и обнаружительной способностью. Для применяемых в ВОСП фотодиодов наиболее часто в паспортных данных приводят порог чувствительности и ток шума. Ток шума представляет собой среднеквадратическое значение флуктуаций темнового тока в заданной полосе частот ΔF и определяется по формуле

$$I_{ш} = \sqrt{2qI_{\tau}MF_M} \sqrt{\Delta F},$$

где q — заряд электрона; I_{τ} — темновой ток на выходе фотодиода; F_M — коэффициент избыточного шума лавинного умножения. Для $p-i-n$ -фотодиода в этой формуле следует положить $M=1$ и $F_M=1$.

Коэффициент избыточного шума лавинного фотодиода

$$F_M = Mk + (2-1/M) \cdot (1-k),$$

где k — отношение коэффициентов ударной ионизации носителей заряда (меньшего к большему независимо от того, относятся они к электронам или дыркам). Приблизительно величина $F_M = M^x$, где $x=0,2...0,3$ для кремниевых ЛФД и $x \approx 1$ для ЛФД из германия; у лавинных фотодиодов, изготовленных на основе полупроводниковых материалов типа $A^{III}B^V$, x лежит в пределах 0,3...1.

Ток шума, приведенный к единичной полосе частот ($I_{ш}/\sqrt{\Delta F}$), называется плотностью шумового тока. Плотность шумового тока лавинного фотодиода, $A/\sqrt{Гц}$:

$$I_{ш}^* = \sqrt{2qI_{\tau}MF_M}.$$

Другим параметром, характеризующим шумовые свойства фотоприемника, является порог чувствительности. Порог чувствительности определяется как среднеквадратическое значение первой гармоники действующего на фотоприемник модулированного по интенсивности излучения, при котором среднеквадратическое (эффективное) значение еототока первой гармоники равно среднеквадратическому значению тока шума в заданной полосе на частоте модуляции. Обычно порог чувствительности приводит к единичной полосе и часто называют эквивалентной мощностью шума. Эквивалентная мощность шума, Вт/ $\sqrt{Гц}$, определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприемника, при которой отношение сигнал/шум равно единице, и определяется по формуле

$$P_{min} = \sqrt{2qI_{\tau}MF_M} S_i.$$

Область спектральной чувствительности фотоприемника определяется диапазоном длин волн, в котором токовая чувствительность составляет не

менее 10% от своего максимального значения. На практике стремятся использовать фотоприемник, имеющий на рабочей длине волны ВОСП максимум чувствительности. Поэтому длину волны, на которой имеется максимум токовой чувствительности фотодиода, часто называют рабочей длиной волны.

При выборе фотоприемника для ВОСП необходимо руководствоваться задачей минимизации мощности принимаемого излучения, требуемой для получения заданного отношения сигнал/шум или коэффициента ошибок. Лавинные фотодиоды в этом смысле имеют преимущество перед $p-i-n$ -фотодиодами. Однако они обладают рядом недостатков по сравнению с $p-i-n$ -фотодиодами. Одним из главных недостатков ЛФД является сильная температурная зависимость коэффициента умножения (рис 4.15). Другими недостатками являются требование более высокого напряжения питания, меньшая надежность и относительно высокая стоимость. Поэтому в ВОСП широко используют $p-i-n$ фотодиоды.

Краткие сведения о параметрах фотодиодов, выпускаемых отечественной промышленностью и предназначенных для применения в ВОСП, приведены в табл. 4.5, более подробные — в табл. 4.6, а о зарубежных фотодиодах — в табл. 4.7.

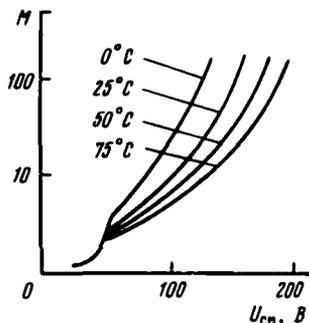


Рис 4.15 Зависимость коэффициента умножения ЛФД от рабочего напряжения

Таблица 4.5

Марка	Рабочая длина волны, мкм	Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт	Темновой ток, нА	Время нарастания, нс
ФД-227	0,85	0,3	100	20
ФД-252	0,85	0,45	10	1
ФД-271	0,85	0,4	5	3
ФД-272	0,85	0,4	5	2
ЛФД-2(А)	—	5 (на $\lambda = 1,06$ мкм)	$1 \cdot 10^3$ 1 (без умножения)	0,35
ФДЛ-118	0,85	20 ... 140	умножения)	1,1 ... 1,5
ФДЛ-119	1,3	0,6 (без умножения)	50	1

Таблица 4.6

Тип фотоприемника	Рабочая длина волны, мкм	Диаметр фоточувствительной площадки, мкм	Рабочее напряжение, В
ЛФД на основе кремния	0,8...0,9	200	150 .. 300
		500	150...300
ЛФД на основе германия	1,3	200	30... 45
		100 80	
Фотодиод на основе соединенный InGaAs	1,3	200	5(10)
		80	
Фотодиод на основе соединенный InGaAs	1,55	200	5(10)
		80	

Таблица 4.7

Фирма-изготовитель	Марка	Материал	Структура прибора	Время нарастания, нс	Эквивалентная мощность шума, Вт/Гц	Максимальный коэффициент умножения
Advanced Detector	AD101 22BH18M	Si	$p-i-n$	1,0	$1 \cdot 10^{-13}$	—
		Si	$p-n$	6,0	$2 \cdot 10^{-14}$	—
Antel	AS-100 AR-S5	Si	$p-i-n$	0,25	$1 \cdot 10^{-14}$	—
		Si	ЛФД	0,09	$1 \cdot 10^{-10}$	100
Optronics	AR-610 AR-620	Ge	$p-i-n$	0,05	$1 \cdot 10^{-10}$	—
		Ge	ЛФД	0,05	$1 \cdot 10^{-10}$	30
NEC Corp.	NDL2102	Si	$p-i-n$	1,0	—	—
	NDL1202	Si	ЛФД	1,0	—	600
	NDL5102	Ge	ЛФД	0,3	—	50
	NDL5500	InGaAs	ЛФД	—	—	30
RCA	C30971	Si	$p-i-n$	0,5	$1,3 \cdot 10^{-13}$	—
	C30979	InGaAs	$p-i-n$	1,0	$2,7 \cdot 10^{-13}$	—
Opto Electronics	PD10	Si	$p-i-n$	0,09	$1 \cdot 10^{-10}$	—
	PD20	Ge	$p-n$	0,08	$1 \cdot 10^{-10}$	—
	PD40	Ge	ЛФД	0,09	$1 \cdot 10^{-10}$	10
Epitaxx	ГТХ65	InGaAs	$p-i-n$	0,1	—	—
	ЕТХ500	InGaAs	$p-i-n$	50	$1 \cdot 10^{-13}$	—

Темновой ток, нА	Плотность шумового тока, А/√Гц	Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт	Емкость пФ	Время нарастания (спада), нс
—	$3 \cdot 10^{-13}$	≥ 100	≤ 1	$\leq 1(1)$
—	10^{-12}	≥ 50	1 3	$\leq 3(4)$
80 100 60 80 30 40	$5 \cdot 10^{-12}$ $1 \cdot 10^{-11}$	6 15 10 20 10 20	2 2,3 $\leq 1,2$ $\leq 1,0$	0,3(0,6) 0,2(0,25) 0,12(0,2)
80 100 60 80 30 40	$5 \cdot 10^{-12}$ $1 \cdot 10^{-11}$	6 16 8 30 10 30	$\leq 2,3$ $\leq 1,2$ $\leq 1,0$	0,5(0,7) 0,3(0,6) 0,2(0,3)
2 20 1 10	—	0,6 0,8	2 4 0,7 0,9	$\leq 0,4(1)$ $\leq 0,3(0,8)$
2 20 1 10	—	0,6 0,9	2 4 0,7 0,9	$\leq 0,4(1)$ $\leq 0,3(0,8)$

4.3. Передающие и приемные оптоэлектронные модули

Передающие и приемные оптоэлектронные модули предназначены для преобразования соответственно электрических сигналов в оптические и оптических в электрические. Элементами, выполняющими эти преобразования, являются полупроводниковые источники излучения и фотоприемники, рассмотренные выше. Типичный передающий оптоэлектронный модуль (ПОМ) содержит полупроводниковый источник излучения (лазерный диод или светодиод), электронные схемы возбуждения и стабилизации работы излучателя а также оптический соединитель или отрезок оптического кабеля. Приемный оптоэлектронный модуль (ПРОМ) образуют р-и-п фотодиод или ЛФД, электронные схемы обработки фототока и стабилизации работы фотоприемника (ЛФД), оптический соединитель или отрезок оптического кабеля. Как передающий так и приемный модуль выполнен в виде герметичной конструкции (рис 4.16), что повышает надежность и улучшает условия эксплуатации источников излучения и фотоприемников. Структурные схемы ПОМ и ПРОМ показаны соответственно на рис 4.17 и 4.18.

Основными параметрами передающих оптоэлектронных модулей цифровых ВОСП являются средняя мощность излучения, длина волны, ширина спектра излучения и скорость перетактирования. В ряде случаев задаются также эксплуатационные параметры, как интервал рабочих температур, входное напряжение, напряженье питания и др. Средняя мощность излучения определяется как среднее за заданный интервал

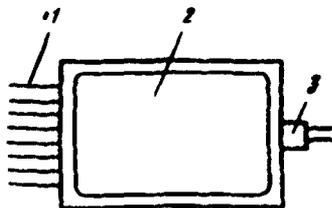


Рис 4.16 Конструкция оптоэлектронного модуля

1 — внешние электрические выводы,
2 — корпус
3 — оптический соединитель

времени значение мощности на выходе оптического соединителя (выходном оптическом полюсе)* в заданном телесном угле при определенном входном напряжении. Длина волны излучения ПОМ, на которой нормируются его параметры, часто называется рабочей длиной волны. Ширина спектра ПОМ определяется шириной спектра используемого излучателя, а скорость передачи зависит от быстродействия источника излучения и электронной схемы возбуждения. Под входным напряжением обычно понимают входное напряжение логической «1» и логического «0». Как правило, эти напряжения соответствуют стандартным сигналам семейства ТТЛ или ЭСЛ интегральных микросхем. Для уменьшения влияния температурной нестабильности характеристик лазерного диода в состав ПОМ входит фотоприемник (обычно $p-i-n$ -фотодиод), используемый в качестве датчика обратной связи. Ответвление части оптической мощности излучателя в цель обратной связи осуществляют с заднего торца лазерного диода, а фототок датчика используют для управления режимом работы излучателя.

Приемные оптоэлектронные модули ВОСП характеризуются следующими основными параметрами: рабочей длиной волны, напряжением шума, вольтовой чувствительностью, пороговой мощностью или пороговой чувствительностью, скоростью передачи и коэффициентом ошибок. Определенную роль играют и эксплуатационные параметры (напряжение источника питания, выходное напряжение, соответствующее логическим «1» и «0», интервал рабочих температур и др.). Под рабочей длиной волны ПРОМ понимают длину волны принимаемого оптического излучения, для которой

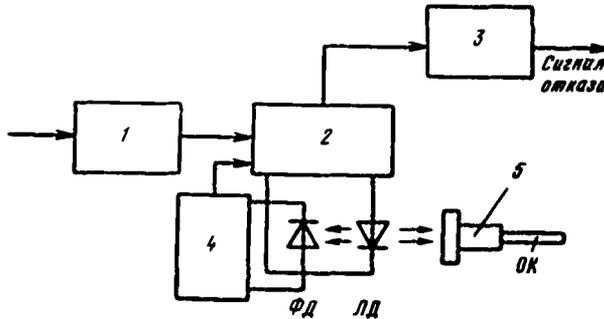


Рис. 4.17. Структурная схема передающего оптоэлектронного модуля:

1 — формирователь и схема блокировки; 2 — формирователь импульсов тока накачки; 3 — схема встроенной диагностики; 4 — усилитель фототока; 5 — согласующее устройство и оптический соединитель, ФД — фотодиод; ЛД — лазерный диод

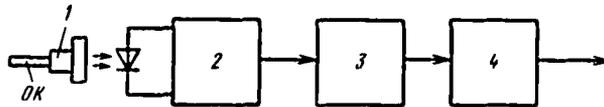


Рис. 4.18. Структурная схема приемного оптоэлектронного модуля:

1 — оптический соединитель и согласующее устройство; 2 — маломушумящий предусилитель; 3 — усилитель с АРУ; 4 — фильтр-корректор

* Оптический полюс — место ввода (вывода) оптического излучения в компонент ВОСП.

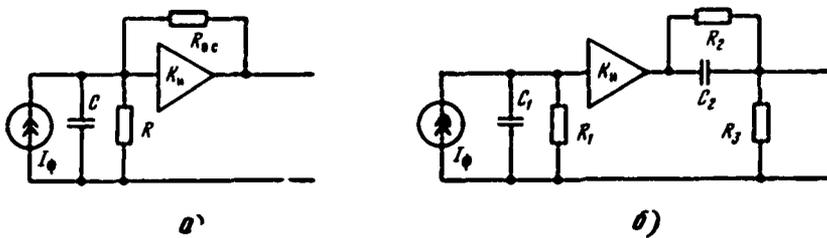


Рис 4.19. Входные цепи ПРОМ на трансимпедансном (а) и интегрирующем (б) предусилителях

его параметры нормированы. Напряжение шума ПРОМ представляет собой среднеквадратическое значение флуктуаций его выходного напряжения в заданной полосе частот при отсутствии оптического излучения на входном оптическом полюсе. Это напряжение обусловлено не только шумами фотоприемника, но и шумами предусилителя, включенного непосредственно после фотоприемника и обеспечивающего предварительное усиление фототока. Основное требование к предусилителю — обеспечение минимального уровня собственных помех в полосе частот усиливаемого сигнала. Вольтовая чувствительность представляет собой отношения напряжения на заданной нагрузке ПРОМ к мощности излучения, вызвавшего появление этого напряжения. Значение вольтовой чувствительности приемных оптоэлектронных модулей обычно лежит в пределах $10^4 \dots 10^6$ В/Вт.

Важным параметром ПРОМ является пороговая чувствительность. Порог чувствительности определяет минимальную среднюю мощность излучения на входе ПРОМ для заданного сигнала (код в линии, скорость передачи), при которой обеспечивается заданное отношение сигнал/шум или заданный коэффициент ошибок. Чем меньше порог чувствительности, тем больше энергетический потенциал системы, а следовательно, и длина участка регенерации. Поэтому минимизация порога чувствительности является одной из главных задач при разработке приемных оптоэлектронных модулей.

В качестве предусилителя в приемных оптоэлектронных модулях применяют трансимпедансный и интегрирующий усилители. Структурные схемы входных цепей ПРОМ для таких предусилителей показаны на рис. 4.19. Обе схемы могут работать до скорости передачи 400 Мбит/с, а в некоторых случаях и до 1 Гбит/с. Основным недостатком интегрирующего усилителя является его насыщение при длинной серии единиц, а недостатком трансимпедансного усилителя — сложность обеспечения устойчивости на высоких частотах. В схеме интегрирующего предусилителя входная цепь благодаря высокому входному сопротивлению представляет собой интегратор. Частотная характеристика входной цепи на частоте $f_1 = 1/2\pi R_1 C_1$ имеет простой полюс, который приводит к спаду логарифмического коэффициента передачи с крутизной -6 дБ/окт. Этот спад корректирует дифференциатор R_2, C_2, R_3 с малой постоянной времени, установленный на выходе усилителя K_u . Частота нуля дифференциатора $f_2 = 1/2\pi R_2 C_2$ выбирается равной частоте f_1 , что позволяет обеспечить увеличение общей полосы пропускания до частоты $f_3 = 1/2\pi R_3 C_2 \gg f_1$. У трансимпедансного предусилителя полоса пропускания равна $G/2\pi R_{о.с} C$, где G — коэффициент усиления по петле обратной связи. Однако на практике она снижается из-за паразитных емкостей обратной связи.

Параметры ряда передающих и приемных оптоэлектронных модулей, применяемых в цифровых ВОСП, приведены соответственно в табл. 4.8 и 4.9. Особый интерес представляют интегрально-оптические модули, в которых в одном кристалле интегрированы электронные и оптоэлектронные компоненты.

Таблица 48

Параметр	МПД-1-1А(Б) МПД-1-2А(Б) МПД-1-3А(Б)	МПД-3-1	МПД-4-1	КЭМ-8-4ПД- -А(Б)	КЭМ-34-4ПД	НЛ132П (НЛНасП)	V23800 (Simens)
Средняя мощность излучения, мВт	1(2)*	—	0,5	1*	1*	1,2	0,008
Длина волны излучения, мкм	0,78 0,88	0,8...0,95	1,3	0,82...0,88	0,82...0,88	1,3	1,285... .. 1,355
Ширина спектра излучения, нм	1(2)	—	—	4	4	1	160
Максимальная скорость передачи, Мбит/с	17	8,5	200	17	50	1000	200
Наработка на отказ, ч	$1,5 \cdot 10^4$	—	10^4	10^3	10^3	10^5	—
Интервал рабочих температур, °С	—60 +55	—60 +85	—60 +55	—10 +40	—10 +40	—40 +60	—25 +85
Потребляемый ток, мА	300	500	—	300	600	200	130

* В диаметре сопряжения 50 мкм и NLA-02.

Параметр	МПР-1-1А(Б) МПР-1-2А(Б) МПР-1-3А(Б)	МПР-3-1	КЭМ-8-4ПР-А (КЭМ-8-4ПР-Б)	КЭМ-34-4ПР-А (КЭМ-34-4ПР-Б)	V23804 (Siemens)
Рабочая длина волны, мкм	0,85	0,85	0,85	0,85	1,3
Пороговая мощность, Вт	$3 \cdot 10^{-4}$	—	$1,5 \cdot 10^{-6}$ ($7,5 \cdot 10^{-7}$)	$3 \cdot 10^{-6}$ ($7,5 \cdot 10^{-6}$)	$5 \cdot 10^{-7}$
Вольтовая чувствительность, В/Вт	—	—	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^4$	—
Время нарастания (спада) переходной характеристики, нс	10	—	20(20)	7(7)	1,3*
Вероятность ошибки, не более	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-12}
Наработка на отказ, ч	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	10^4	10^4	—
Интервал рабочих температур, °С	$-40 \dots +85$	$-60 \dots +85$	$-10 \dots +40$	$-10 \dots +40$	$-25 \dots +85$
Потребляемый ток, мА	120	—	50	60	50

* По уровню 0,2...0,8.

В качестве примера приведем характеристики отечественного интегрально-оптического передающего модуля, функции генерации, усиления и модуляции лазерного излучения которого обеспечиваются одним кристаллом при работе непосредственно с внешними ЭСЛ и ТТЛ микросхемами

Длина волны излучения, мкм	0,8 . . 0,9
Импульсный перепад мощности излучения, введенного в оптическое волокно, мВт	1...3
Уровень фонового излучения, мВт, не более	0,1
Максимальная скорость передачи в формате БВН (NRZ), Мбит/с, не менее	500
Ток смещения, мА	.60 . 120
Габаритные размеры (с выводами), мм	.10×10×30
Масса, г	.5
Напряжение управляющих импульсов, В	
низкого уровня, не более	.1,2
высокого уровня, не менее	.1,7

4.4. Оптические компоненты

Оптические соединители. Оптический соединитель представляет собой устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта ВОСП в местах ввода или вывода излучения в оптическое волокно. Такими местами являются оптические соединения оптоэлектронных модулей (передающего и приемного) с волокном кабеля, соединения отрезков оптических кабелей между собой, а также с другими компонентами, например оптическими разветвителями. Оптические соединители используют и при проведении различных измерений для подключения измерительных приборов. Различают разъемные и неразъемные соединители. Разъемный оптический соединитель допускает многократное оптическое соединение, а неразъемный — только однократное соединение. Неразъемные соединители используют при постоянном монтаже оптических кабелей, а разъемные соединители — в тех местах, где приходится производить неоднократные оптические соединения. Поскольку для постоянного монтажа оптических кабелей в настоящее время почти исключительно применяют сварные соединения, то ограничимся кратким рассмотрением разъемных соединителей, предварительно отметив основные требования, предъявляемые к оптическим соединителям.

Основные требования к оптическим соединителям малые вносимые потери, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции. Дополнительно к разъемным соединителям предъявляют требование неизменности параметров при повторном соединении. Кроме того, любая их целесообразная конструкция по возможности должна исключать необходимость дополнительной юстировки.

Потери в соединителях в основном возникают из-за несовместности и несоосности элементов конструкции. Поэтому для получения малых потерь необходимо обеспечить высокую точность изготовления деталей соединителя, ответственных за точность оптической юстировки. Например, для одномодовых соединителей точность обработки деталей обычно лежит в пределах долей микрона, что достаточно сложно обеспечить. Для уменьшения отражений, которые влияют на работоспособность высокоскоростных ВОСП, в соединителях таких систем применяют просветление торцов волокон и иммерсионные жидкости.

При соединении оптических волокон с одинаковыми номинальными размерами сердцевин и одинаковым распределением показателя преломления по радиусу волокна наиболее эффективно соединение торца в торец (торцевое сочленение). Основной задачей при торцевом сочленении является обес-

печение строгой соосности, идентичности геометрии торцов, перпендикулярности их поверхностей оптическим осям и высокая степень гладкости торцов.

На рис. 4.20 показаны возможные дефекты при торцевом соединении оптических волокон. Коэффициент передачи оптической мощности излучения от одного волокна в другое в идеальном случае при отсутствии дефектов сопряжения $K=1$. Если имеют место дефекты сопряжения, то при радиальном смещении $K_\delta=1-\delta/d$, угловом смещении $K_\theta=1-\theta/\theta_a$ и осевом смещении $K_s=1-\text{ctg}\theta_a/2d$, где θ_a и d — апертурный угол и диаметр волокна; θ — угол смещения; s — расстояние между торцами волокон; δ — радиальное смещение.

Приведенные выражения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами при относительно малых значениях δ , θ и s , а именно $\delta/d \ll 1$, $s/d \ll 1$ и $\theta < 10^\circ$. При этих значениях дополнительные потери, вносимые рассогласованностью соединяемых волокон, могут быть определены соответственно по формулам $a_\delta = 10 \lg(1/K_\delta)$, $a_\theta = 10 \lg(1/K_\theta)$, $a_s = 10 \lg(1/K_s)$, дБ.

Исследования показывают, что наиболее жесткие требования предъявляются к радиальному и угловому смещениям. Наличие зазора между торцами волокон влияет на дополнительные потери существенно меньше.

Конструкции разъемных соединителей весьма разнообразны, но условно могут быть разделены на два типа: симметричный и несимметричный. На рис. 4.21 схематически показаны конструкции таких соединителей. Конст-

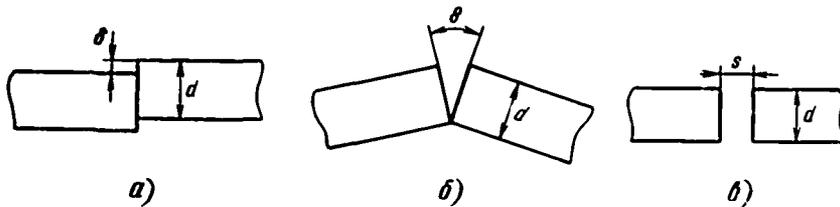


Рис. 4.20. Смещение волокон при торцевом соединении оптических волокон: а — радиальное; б — угловое; в — осевое

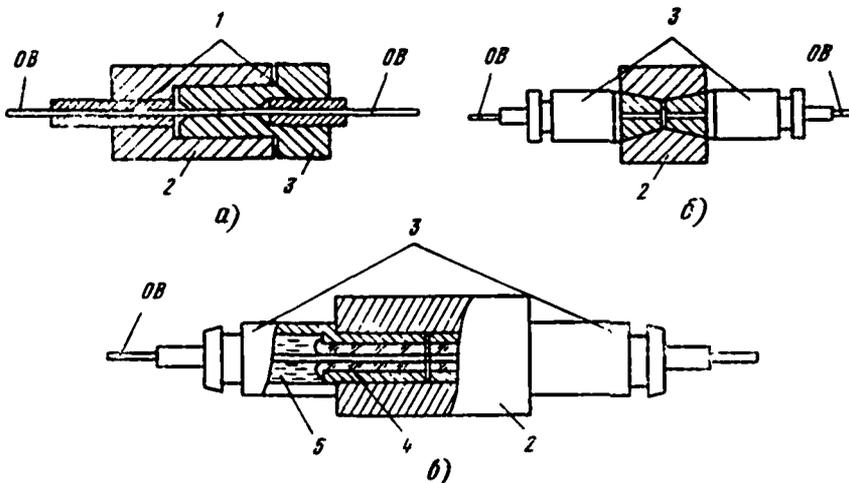


Рис. 4.21. Разъемные соединители:

а — несимметричный штекерный, б, в — симметричные штекерные: 1 — стальные трубки; 2 — гнездо, 3 — штырь, 4 — капилляр, 5 — эпоксидный компаунд

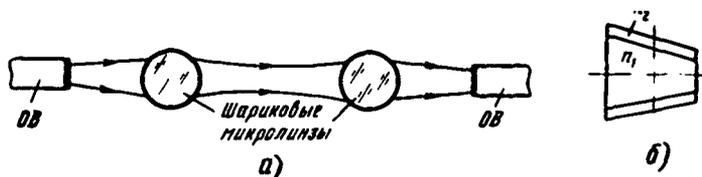


Рис. 4.22. Оптическая схема соединителя с шариковыми микролинзами (а) и фоков (б)

рукция несимметричного штекерного соединителя состоит из двух частей: вилочной (штыря) и розеточной (гнезда). В гнездо и штырь вставляют заранее подготовленные концы волокон, зафиксированные в стальных или стеклянных трубках (капиллярах), которые надевают на оболочку волокон, образуя оптический наконечник. Торцы волокон тщательно шлифуют и полируют. После выполнения операции соединения сопрягаемые поверхности плотно соприкасаются друг с другом, а торцы волокон оказываются разделенными очень небольшим зазором.

В конструкции соединителя симметричного типа на концах соединяемых волокон монтируют два одинаковых штыря. Гнездо соединителя не содержит оптических деталей и служит лишь направляющим устройством, в которое с двух сторон симметрично входят штыри. Точность взаимного расположения торцов волокон обеспечивается сопрягаемыми поверхностями гнезда и штырей. Для фиксации положения вилочной и розеточной частей в обоих типах соединителей используют гайки с накаткой, накручиваемые на поверхность розеточной части, имеющей резьбу (на рис. 4.21 не показано). Средние потери, вносимые такими соединителями, составляют около 1 дБ, что достигается прецизионной технологией обработки деталей.

В оптических соединителях с юстировкой соединяемые волокна или наконечники располагают внутри двух эксцентричных втулок, что дает возможность их юстировки путем поворота вилки относительно розетки. Эксцентриситет в одномодовых соединителях составляет примерно 1 мкм, а вносимые потери меньше 1 дБ. Недостатком таких соединений является необходимость юстировки и ее контроль.

В ряде случаев в конструкциях соединителей оптических волокон применяют микролинзы (шариковые и цилиндрические). Пример оптической схемы соединителя с шариковыми микролинзами показан на рис. 4.22, а. Использование шариковых микролинз повышает эксплуатационные характеристики соединителя ввиду низкой чувствительности к загрязнениям. Недостатком соединителей на микролинзах является увеличение вносимых потерь. Микролинзы, а также фоконы (рис. 5.22, б)* часто применяют в розеточной части соединителей, устанавливаемой на корпусах оптоэлектронных модулей, ответвителей и др. В этом случае применение этих элементов в модулях существенно снижает потери ввода-вывода излучения при соединении кабеля с излучателем и фотоприемником.

Краткие сведения о характеристиках разъемных соединителей, выпускаемых зарубежными фирмами, приведены в табл. 4.10.

Оптические разветвители. Оптические разветвители играют важную роль как при построении ВОСП, так и в решении частных задач (организация контроля и измерений, оптическая обратная связь и др.). Оптический разветвитель представляет собой в общем случае многополюсное устройство, в котором излучение, подаваемое на часть входных оптических полюсов распределяется между его остальными оптическими полюсами. В частном случае разветвитель, имеющий три оптических полюса, называется ответвителем.

* Фоко́н — короткий отрезок оптического волокна переменного диаметра.

Таблица 410

Фирма-изготовитель	Марка	Тип кабеля*	Размеры волокна (сердцевина-оболочка), мкм	Число соединяемых волокон	Вносимые потери, дБ	Дополнительные потери**, дБ
Amphenol	905 (SMA)	М	Широкий диапазон 50/125; 100/140	1	1,00	0,2
	801	М		4 или 8	1,50	0,2
	942 (FSN)	О, М		1	0,70	0,1
Fiber Optek Interconnect Corp	SMB 01	О	8/125	1	<1,00	0,3
	MMB 01	М	50/125, 62,5/125, 100/140	1	<1,00	0,3
Hitachi Cable Ltd.	HFC-701	М	50/125, 85/125	1	0,70	0,7
	HFC-602	М	50/125, 85/125	1	1,00	1,0
GTE Fiber Optic Products	PC	О	—/125	1	<0,5	<0,5
	D4	О	—/125	1	<1,00	<1,0
	FC	М	50/125, 62,5/125, 85/125	1	<0,70	<0,7
Interoptics/Diamond	GFS-3	М	50/125, 100/140	1	0,60	0,6
	MMS-3/0	О	4/80, 8/125	1	0,60	0,6
NEC Corp	OD9312	О	10/125	1	<1,00	—
	OD9313	М	50/125, 62,5/125, 80/125	1	<1,00	—
	OD9414/ /9424	О	10/125	1...12	<1,00	—

* О — одномодовый М — многомодовый

** После 500 включений

Различают направленные и ненаправленные разветвители, а также разветвители, чувствительные к длине волны (спектрально-селективные) и нечувствительные (неселективные). В направленном разветвителе коэффициенты передачи между оптическими полюсами зависят от направления распространения оптического излучения, а в спектрально-селективном разветвителе — от длины волны. Направленные и спектрально-селективные разветвители позволяют организовать двухстороннюю передачу сигналов по одному волокну (соответственно по принципу однополосной двухпроводной и двухполосной двухпроводной системы). Спектрально селективные разветвители используют также в системах спектрального уплотнения.

Общими требованиями, предъявляемыми к параметрам направленных разветвителей, являются малые потери, высокое переходное затухание между встречными направлениями передачи, а также сохранение состояния поляризации для одномодовых разветвителей и модового состава распространяющегося излучения для многомодовых разветвителей. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют разветвители, полученные путем сплавления

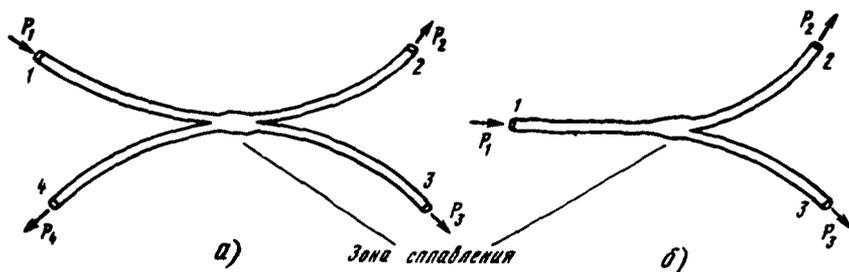


Рис. 4 23 Направленные сплавные разветвители:
а — X типа, б — Y-типа

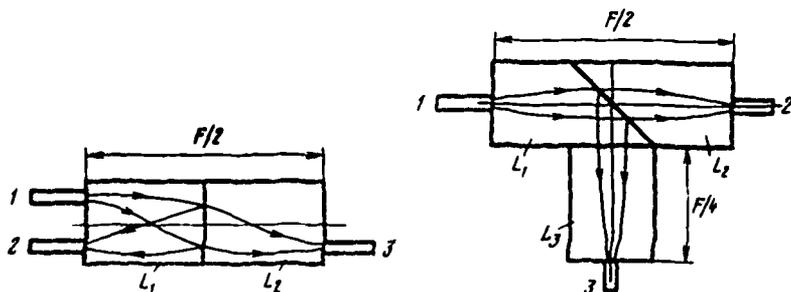


Рис 4 24 Разветвители на цилиндрических градиентных линзах
(1, 2, 3 — оптические полюса, выполненные в виде отрезков волокон)

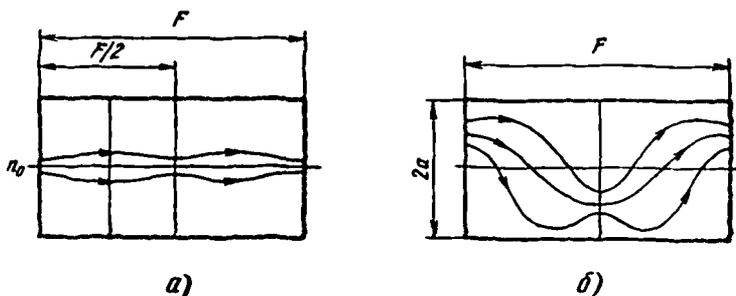


Рис 4 25 Ход лучей в цилиндрической градиентной линзе при падении луча:
а — осевом, б — неосевом

ния оптических волокон в монолитную конструкцию. Важными достоинствами сплавных разветвителей, конструкции X- и Y-типа которых схематически показаны на рис 4 23, являются механическая прочность и стабильность (на рисунке цифрами обозначены оптические полюса).

Деление мощности с помощью разветвителя X-типа характеризуется следующими параметрами: коэффициентом ответвления $a_0 = 10 \lg P_1/P_3$, дБ, коэффициентом направленности $a_n = 10 \lg P_1/P_4$, дБ, вносимыми потерями $a_v = 10 \lg [P_1/(P_2 + P_3)]$, дБ.

Для разветвителя (ответвителя) Y-типа коэффициент ответвления и вносимые потери определяются аналогичными соотношениями, а коэффициент

направленности $a_n = 10 \lg(P_2/P_3)$, дБ, где P_3 — мощность оптического излучения на оптическом полюсе 3 при подаче излучения мощности P_2 на оптический полюс 2.

Помимо сплавных разветвителей часто используют разветвители с цилиндрическими градиентными линзами. Две конструкции таких разветвителей показаны на рис. 4.24. Цилиндрическая градиентная линза представляет собой отрезок градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления. Однако в отличие от оптического волокна она имеет больший диаметр (порядка 1...2 мм) и не имеет оболочки. Распределение показателя преломления цилиндрической градиентной линзы в радиальном от оси направлении задается параметром g , который называется степенью фокусирования, и определяется выражением $n(r) = n_0[1 - 0,5(gr)^2]$ при $|r| \leq a$, где n_0 — показатель преломления на оси.

Ход лучей, распространяющихся в такой линзе при осевом и неосевом падении луча, показан на рис. 4.25. Синусоидальная траектория распространения имеет период $F = 2\pi/g$, называемый шагом или фокусным расстоянием линзы. Изменяя параметр g , можно управлять фокусным расстоянием. Плоские торцы цилиндрической градиентной линзы позволяют строить на ее основе разнообразные механически прочные и компактные оптические устройства (согласующие соединители для передачи излучения от лазерного диода в волокно, разветвители и др.).

Характеристики некоторых неселективных разветвителей отечественного и зарубежного производства приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Фирма-изготовитель	Марка	Тип	Тип кабеля	Длина волны мкм	Коэффициент ответвления, дБ	Коэффициент направленности, дБ	Вносимые потери, дБ
ИОФАН (г. Москва)	—	X	O	0,8...1,6	3	>70	≤0,1
НИИ ПФ (г. Ташкент)	—	X	O, M	0,6...1,55	3 (для одно- модовых), 2 (для много- модовых)	>40	≤0,2
JDC Optics	ACS11 ACS19	Y Y	O M	1,2...1,35 1,2...1,35	3 0,4	30 30	<1 <1
NEC Corp.	OD-8606K OD-8606L OD-8607K OD-8607L	— — — —	M M O O	0,85...1,3 0,85...1,3 1,3...1,55 1,3...1,55	3 0,4 3 0,4	>35 >35 >40 >40	≤1,5 ≤1,5 ≤2,0 ≤2,0

Спектрально-селективные разветвители строят в основном на интерференционных фильтрах и дифракционных решетках. В спектрально-селективных разветвителях на интерференционных фильтрах осуществляется последовательное разделение (объединение) стволов, поэтому их увеличение вызывает пропорциональное увеличение числа элементов (фильтров, линз) и соответ-

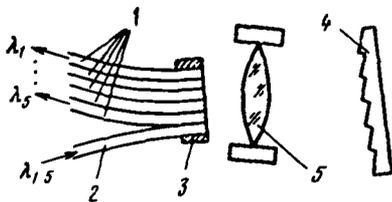


Рис 4 26 Спектрально-селективный разветвитель на дифракционной решетке
1 — выходные ОВ; 2 — входное ОВ, 3 — кассета, 4 — дифракционная решетка, 5 — микрообъектив

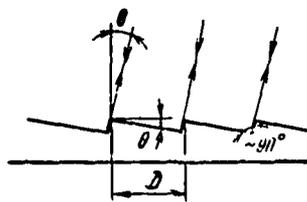


Рис 4 27 Профиль штриха дифракционной решетки и ее установка по автоколлимационной схеме

венно потерю излучения. Следовательно, их целесообразно использовать в тех случаях, когда число стволов невелико (2...4). При большем числе стволов применяют спектрально-селективные разветвители на дифракционных решетках, достоинством которых является параллельное разделение (объединение) стволов на одной решетке. Конструкция разветвителя на дифракционной решетке показана на рис 4 26. Ее основные элементы — дифракционная решетка, обладающая высокой эффективностью дифракции света в рабочем диапазоне длин волн, высококачественный микрообъектив и кассета с плотно уложенными в ней выходными и входными оптическими волокнами, торцы которых расположены в фокальной плоскости объектива. Такая конструкция представляет собой по сути мини-спектрограф автоколлимационного типа по схеме Литтроу. Линейная дисперсия в фокальной плоскости для данной конструкции разветвителя определяется соотношением $d\lambda/dl = D \cos \theta / F$, где F — фокусное расстояние объектива, D — период решетки, θ — угол дифракции относительно нормали к решетке (угол блеска).

Изображенная на рис. 4 26 дифракционная решетка является отражательной. Такую решетку часто называют также концентрирующей или «блестящей». Это название связано с тем, что для отражательной решетки максимальная интенсивность дифрагировавшего излучения наблюдается в направлении луча, зеркально отраженного от одной из плоскостей штриха решетки. При работе решетки в автоколлимационном режиме угол дифракции равен углу блеска (рис. 4 27). Порядок дифракционного спектра m , в котором будет наблюдаться максимальная интенсивность излучения с длиной волны λ_0 определяется выражением $m = 2D \sin \theta / \lambda_0$. Обычно работу дифракционной решетки используют в первом и втором порядках спектра.

Рассмотренная конструкция спектрально-селективного разветвителя является достаточно громоздкой и механически нестабильной. Более компактная и стабильная конструкция получается путем объединения дифракционной решетки и коллимирующей оптики в одно целое с помощью цилиндрической градиентной линзы (рис 4 28).

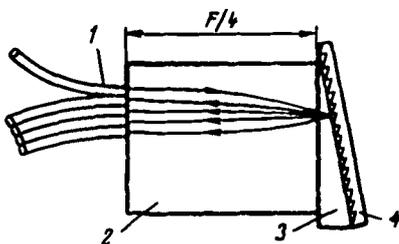


Рис 4 28 Разветвитель на дифракционной решетке с градиентной линзой
1 — оптические волокна 2 — цилиндрическая градиентная линза 3 — призма вставка, 4 — дифракционная решетка

К цилиндрической градиентной линзе с одной стороны через призму-вставку (она не является здесь диспергирующим элементом) приклеена дифракционная решетка, а с другой стороны — оптические волокна. Плоская поверхность торцов линзы позволяет приклеить внешние элементы, обеспечив тем самым жесткую конструкцию.

Некоторые конструкции спектрально-селективных разветвителей на интерференционных фильтрах показаны на рис 4 29. В конструкции из трех отрезков оптического волокна

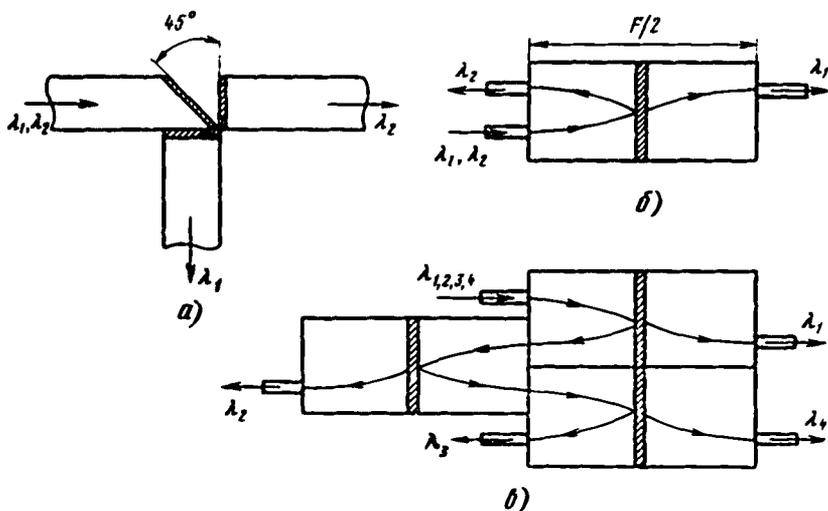


Рис 4.29 Разветвители на интерференционных фильтрах

а — конструкция из трех отрезков волокна, *б, в* — конструкции с градиентными линзами

для фиксации их положения на подложке имеются V образные канавки. Торцы волокон полированы, а их плоскости покрыты многослойными интерференционными фильтрами, представляющими собой чередующиеся слои SiO_2 и TiO_2 . Интерференционный фильтр на скошенном торце входного волокна позволяет разделить излучение двух длин волн по направлениям, а фильтры на торцах выходных волокон представляют собой фильтры чужеродных и верхних частот. Хотя эти фильтры незначительно (на $\sim 0,1$ дБ) увеличивают потери в устройстве зато существенно снижают уровень переходных помех (до -40 дБ и ниже при разделении $\lambda_1 = 0,85$ мкм и $\lambda_2 = 1,3$ мкм).

В качестве примера рассмотрим технические характеристики отечественного спектрально селективного разветвителя УСОД 0,85/1,3. Этот разветвитель построен на интерференционном фильтре и имеет три оптических полюса. Он позволяет осуществить как разделение, так и объединение двух оптических сигналов с несущими на волнах 0,85 и 1,3 мкм. Величина вносимых потерь составляет 3,5 дБ на длине волны 0,85 мкм и 4,5 дБ на длине волны 1,3 мкм, а величина переходного затухания между оптическими полюсами с разными длинами волн лежит в пределах 30–50 дБ в зависимости от направления передачи. Применение разветвителя УСОД 0,85/1,3 позволяет доуплотнить ранее проложенные оптические кабели, повысив тем самым эффективность их использования. При этом значительное переходное затухание исключает ухудшение качества передачи по цифровым оптическим стволам.

Характеристики некоторых зарубежных спектрально селективных разветвителей приведены в табл. 4.12.

Оптические изоляторы. В высокоскоростных ВОСП для защиты лазерных диодов от паразитных отражений со стороны кабеля применяют оптические изоляторы. Оптические изоляторы обеспечивают пропускание излучения в одном направлении почти без потерь, в другом (обратном) направлении их затухание велико. Необходимость применения таких устройств объясняется тем, что отраженное излучение, возвращаясь в лазерный диод, нарушает стабильность условий генерации в активной области и повышает тем самым уровень шума.

В основе работы оптического изолятора лежит электрооптический эффект Фарадея. Этот эффект является взаимным, т. е. поворот плоскости

Таблица 4 12

Фирма-изготовитель	Марка	Число оптических полюсов	Тип кабеля	Диапазоны длин волн, мкм		Переходное затухание, дБ	Вносимые потери, дБ
JDC Optics	WD1315	3	О, М	1,27 1,47	1,36 1,60	>30	<2,5
	WD813	3	М	0,8 1,15	0,9 1,60	>20	<2,0
	WD1213A	3	О, М	1,20 1,31 ... 1,35	1,24 1,35	>25	<3,0
	WD1213B	3	О, М	1,18 1,27	1,22 1,36	>25	<3,0
NEC Corp.	OD 8677	5	М	0,796 0,826 0,856 0,886	0,804 0,834 0,864 0,894	>20	≤5,0
	OD-8678A	3	М	0,79 1,15	0,91 1,35	>35	≤2,0
	OD 8678B	3	М	1,2 1,3		>30	≤3,0
	OD-8678D	3	М	0,74 0,84	0,81 0,89	>40	≤3,0

поляризации излучения, проходящего через магнитооптический материал, под действием внешнего магнитного поля однозначно связан не с направлением распространения излучения, а с направлением намагниченности среды. С помощью поляризатора и анализатора, установленных по обе стороны ячейки Фарадея, невзаимность эффекта можно преобразовать в невзаимность пропускания, что и используется в оптическом изоляторе. Конструкция такого изолятора схематически показана на рис 4 30. В этой конструкции поляризатор и анализатор располагаются так, что их оптические оси скрещены под углом 45° . Поляризация входного луча совпадает с оптической осью поляризатора, и поэтому он проходит через ячейку Фарадея, в которой плоскость поляризации поворачивается на 45° и далее выходит через анализатор. При распространении отраженного излучения в обратном направлении та его часть, поляризация которой совпадает с оптической осью анализатора, снова проходит через ячейку Фарадея, но в обратном направлении. Плоскость поляризации этой части отраженного излучения в ячейке Фарадея снова поворачивается на угол 45° , так что плоскость поляризации оказывается ортогональной оптической оси поляризатора. Поэтому поляризатор не пропускает отраженное излучение.

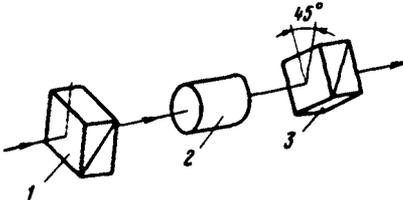


Рис 4 30 Оптический изолятор:
1 — поляризатор, 2 — ячейка Фарадея, 3 — анализатор

Основными требованиями, предъявляемыми к оптическому изолятору, являются малые вносимые потери в прямом направлении ($\sim 1 \dots 2$ дБ) и высокая развязка в обратном направлении (> 20 дБ). Кроме того, должны обеспечиваться прозрачность во всем диапазоне рабочих длин волн и стабильность параметров при изменении температуры. В диапазоне длин волн $1,3 \dots 1,55$ мкм магнитооптическим материалом, используемом в ячейке Фарадея, является железонитриевый гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$). На длине волны $0,85$ мкм используют парамагнитное стекло.

Параметры оптических изоляторов, выпускаемых в Японии корпорацией NEC, приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Параметр	OD-8312	OD-8313	OD-8313-C
Вносимые потери, дБ	1,5	1,5	1,5
Развязка, дБ	25	20	20
Рабочая длина волны, нм	850 ± 30	1300 ± 50	1550 ± 80
Материал ячейки Фарадея	Парамагнитное стекло	$Y_3Fe_5O_{12}$	$Y_3Fe_5O_{12}$
Размеры, мм	$24 \times 23 \times 35$	$10 \times 14 \times 13$	$10 \times 14 \times 13$

Глава 5

Коды для ВОСП

5.1. Основные определения и требования к кодам

Основные характеристики ВОСП (длина регенерационного участка, метод обработки сигналов, система контроля ошибок в регенераторах, система синхронизации, помехозащищенность, искажение сигналов в линии и др.) в значительной степени зависят от выбора кода в линии.

Особенности построения линейных кодов для цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) зависят от физических свойств среды распространения сигналов. Оптическое волокно как среда передачи сигналов, а также источник излучения в передающем и фотодетектор в приемном оптических модулях предъявляют специфические требования к свойствам цифрового сигнала.

Поскольку импульсные посылки излучаемой оптической мощности могут быть только положительными или нулевыми (интенсивность оптического излучения является по самой природе положительной величиной), невозможно непосредственное использование биполярных кодов, применяемых при передаче информации по электрическим кабелям связи.

При реализации цифровых систем передачи в общем случае устанавливается n возможных значений уровня цифрового сигнала ($n=2, 3, 4 \dots$). Однако в цифровых ВОСП использование кода с основанием $n > 2$ (многоуровневые коды) не нашло широкого применения. Причиной являются нелинейность модуляционной характеристики и температурная зависимость мощности излучателя, например лазерного диода, что приводит к необходимости использования двухуровневых кодов. Таким образом, в ВОСП с прямым детектированием и применением модуляции по интенсивности света линейный сигнал в большинстве случаев представляет собой дискретное

сообщение, выраженное в двоичном коде ($n=2$, символы кода «1» и «0»), представляющее случайную последовательность импульсов одинаковой формы, следующих друг за другом через постоянные интервалы времени длительностью T , называемые тактовыми интервалами. Такие сигналы носят название случайных сигналов с детерминированными тактовыми интервалами.

К линейным кодам ВОСП предъявляются следующие основные требования

1 Непрерывная часть энергетического спектра кода должна иметь минимальную спектральную плотность на нулевой частоте, а также НЧ и ВЧ составляющие Ограничение спектра в области нижних частот вызвано в основном двумя причинами. Первая из них связана с требованием безыскаженной передачи принимаемого цифрового сигнала усилителем переменного тока фотоприемника, так как в противном случае для реализации оптимальных условий приема перед решающим устройством необходимо вводить дополнительное устройство, предназначенное для восстановления НЧ составляющей. Это усложняет и удорожает оборудование линейного тракта. Большое усиление при постоянном токе вызывает значительный дрейф постоянной составляющей. Это ограничение является очень жестким для систем, которые используют оптические приемники с высокой чувствительностью.

Второй причиной является то, что оптическую мощность излучателя (например, ЛД), зависящую от окружающей температуры, можно стабилизировать путем введения отрицательной обратной связи по среднему значению излучаемой мощности только при отсутствии НЧ части спектра линейного кода. При наличии НЧ составляющей в спектре линейного кода излучаемая мощность может изменяться под действием информационного сигнала, так как зависит от статистики последнего, и относительно невысокие изменения оптической мощности могут вызвать температурные колебания в ЛД. В этом случае в цепи отрицательной обратной связи должно быть предусмотрено устройство, компенсирующее эти изменения. Все это усложняет и удорожает схемы оптического передатчика.

2 Линейный код должен содержать информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала. В приемнике эта информация используется для восстановления фазы и частоты хранирующего колебания, необходимого для принятия решения пороговыми устройствами приемника и регенератора (энергетический спектр кода в общем случае состоит из двух частей — дискретной и непрерывной). Дискретная часть содержит постоянную составляющую и составляющую на тактовой f_T и кратных ей частотах. Если в энергетическом спектре дискретная составляющая имеется в неявном виде, то для ее выделения на приемной стороне требуется нелинейная обработка сигнала.

Непрерывная часть спектра отражает распределение энергии по частоте, связанное с информационными изменениями временных функций сигнала, являющимися случайными. Наличие дискретной составляющей указывает на детерминированный характер случайного процесса в этом коде.

3 Непрерывная часть энергетического спектра должна иметь низкий уровень в области тактовой (либо кратной ей) частоты, используемой для синхронизации приема, так как чем меньше уровень непрерывной составляющей в области выделяемой дискретной составляющей, тем меньше помехи для устройств выделения тактовой частоты.

4 Желательно, чтобы основная доля энергии непрерывной составляющей энергетического спектра была сосредоточена в относительно узкой части спектра, так как при прочих равных условиях чем уже спектр, тем меньше искажается сигнал за счет ограничения полосы линейного тракта.

5 Процесс линейного кодирования не должен зависеть от статистики сигналов источника информации, и наоборот, код не должен налагать каких-либо ограничений на передаваемое сообщение и обеспечивать однозначную передачу сигналов с любой статистикой. Иначе говоря, код передачи должен отображать любую двоичную последовательность.

6 Для удобства выделения синхрочастоты и обеспечения устойчивой работы регенераторов с самосинхронизацией статистические характеристики цифровых сигналов в линиях не должны быть произвольными. Поэтому должно быть ограничено максимальное число последовательностей символов одного уровня или одной амплитуды (в случае многоуровневого кода).

7 Алгоритм формирования цифрового сигнала должен позволять надежно контролировать качество (достоверность) передачи в процессе автоматической эксплуатации ВОСП путем контроля ошибок регенераторов.

8 Устройства кодирования, декодирования и контроля ошибок должны быть простыми, надежными и малоэнергоемкими с возможностью интеграции схемы.

9 Желательно, чтобы линейный код позволил обеспечить передачу сервисных сигналов.

10 Желательно, чтобы линейный код имел малую избыточность для снижения соотношения между скоростью передачи в линии и скоростью исходных двоичных сигналов и повышения эффективности ВОСП.

11 Линейный код не должен приводить к существенному размножению ошибок при декодировании.

12 Структура линейного кода и форма элементарных символов кода должны соответствовать характеристикам оптического кабеля для минимизации оптической мощности при заданном коэффициенте ошибок с учетом ослабления оптического сигнала при его вводе в волокно и передаче.

13 Сбалансированность линейного кода должна быть близка к 0,5. Если $P_{1л}$ и $P_{0л}$ — соответственно вероятности появления «1» и «0» кода, то при $P_{1л} = P_{0л}$ код сбалансирован, а при $P_{1л} \neq P_{0л}$ несбалансирован.

14 Систематическое фазовое дрожание должно быть низким. Подавление систематического дрожания фаз важно для поддержания хороших передаточных характеристик.

15 Возможность без труда менять число каналов (расширение числа каналов).

16 Малое время вложения в синхронизм.

17 Способность надежного подавления динамической пульсации.

18 Стабильность средней оптической мощности.

19 Совместимость с существующими кодами для электрических кабельных линий связи.

5.2. Основные параметры кодов

Приведем наиболее важные параметры, характеризующие линейные коды, на основании которых можно осуществить их выбор и сравнение.

Избыточность

$$R = \frac{f_{тл} \log_2 n - f_{тл} \log_2 m}{f_{тл} \log_2 n} \quad (5.1)$$

где $f_{тл}$ — тактовая частота информационного цифрового сигнала на входе кодера линейного тракта (или на выходе декодера), m — число разрешенных уровней входного сигнала, $f_{тл}$ — тактовая частота информационного цифрового сигнала на выходе кодера линейного тракта (или на входе декодера линейного тракта), t — в линии передачи, n — число разрешенных уровней выходного сигнала.

В случае, когда используется двоичный двухуровневый код, $n = m = 2$ и избыточность блочного кода

$$R = 1 - \frac{m}{n} \quad (5.2)$$

Избыточность придает сигналу заданные свойства и повышает тактовую частоту.

$$f_{\tau} \approx (n/m) f_{\tau} \quad (53)$$

Однако при достаточно больших m и незначительной разности $m-n$ это увеличение незначительно

Относительная скорость передачи (коэффициент изменения тактовой частоты, эффективность кода)

$$F = n/m \quad (54)$$

Этот параметр характеризует увеличение скорости передачи (увеличение тактовой частоты) при применении данного блочного кода. Очевидно, что чем меньше избыточность кода, тем меньше разница между скоростями

Максимальное число следующих друг за другом одинаковых по амплитуде (уровню) символов. Для бинарных кодов это максимальное число последовательных «0» и «1» ($l_{0 \max}$ и $l_{1 \max}$), которое может иметь линейный сигнал. Эти параметры желательно выбирать минимальными, чтобы упростить тракт выделения тактовой частоты.

Среднее значение символов $\langle b_k \rangle$. Если вероятность появления нулей и единиц в информационном сигнале одинакова ($P_0 = P_1 = 0,5$), то $\langle b_k \rangle = 0,5$. Для уменьшения средней оптической мощности излучателя и дробового шума фотодетектора среднее значение символов целесообразно выбирать минимальным.

Диспаритетность — неравенство числа единиц и нулей в кодовых комбинациях. Различают диспаритетность одной кодовой комбинации (D) и накопленную диспаритетность (D^1). Количественно D определяется разностью единиц и нулей в одном блоке кода, а D^1 — величиной разности единиц и нулей кода с любого момента времени до момента наблюдения. В несбалансированных кодах накопленная диспаритетность монотонно изменяется. Снижение диспаритетности упрощает схему синхронизации и обнаружения ошибок при приеме (регенерация) сигналов и уменьшает содержание в спектре низкочастотных компонентов.

По рекомендациям МККТТ для определения диспаритетности бинарных сигналов следует число единиц умножить на вес одной единицы, равный (+0,5), а число нулей — на вес одного нуля, равный (−0,5).

Цифровая сумма (ЦС). Цифровой суммой называют алгебраическую сумму амплитуд импульсов на временном отрезке n -уровневого кода, отнесенную к абсолютному значению разности соседних по величине уровней. Различают ЦС двух видов: накопленную цифровую сумму (НЦС) кодового блока, кодовой группы, кодового слова и текущую цифровую сумму (ТЦС). Накопленная цифровая сумма — это число возможных значений, которое принимает цифровая сумма для одного блока кода, НЦС блока из n элементов двухуровневого сигнала.

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \sigma_i' \quad (55)$$

Для двоичных кодов значения элементов σ_i' цифровой суммы определяют вероятностями появления единиц (P_{1i}) и нулей ($P_{0i} = 1 - P_{1i}$), $\sigma_i' = P_{0i}$ для символов «1», $\sigma_i' = -P_{1i}$ для символов «0». Накопленная цифровая сумма совпадает с числом состояний кодека (кодера декодера), и ее величина определяет сложность кодека.

Текущая цифровая сумма определяется алгебраической суммой амплитуд n уровней кода с любого момента времени до момента наблюдения.

$$Y_m = \sum_{j=-\infty}^m \sigma_j \quad (56)$$

где j — порядковый номер бита кодовой комбинации кода в начале отсчета времени, m — порядковый номер бита в момент наблюдения.

Число возможных состояний ТЦС в моменты окончания кодовых блоков обозначается S_k . Увеличение S_k приводит к увеличению сложности кодека. Одновременно усложняется контроль блочной синхронизации. Кроме

того, для любого кода существует определенное число значений, обозначенное S_m , которое может иметь ТЦС при безошибочном приеме элементов кода. Сложность схемы контроля ошибок определяется S_m .

Плотность непрерывной составляющей спектра в области низких частот, примаыкающих к частоте $f=0$. Она оценивается коэффициентами Δ_1 и Δ_2 (доли мощности непрерывной составляющей энергетического спектра сигнала, сосредоточенные в области $fT=0 \dots 0,03$ и $fT=0 \dots 0,1$ соответственно). При отсутствии или низком уровне непрерывных составляющих в НЧ части энергетического спектра кода кроме отмеченных выше достоинств имеется возможность эффективно передавать сигналы служебной связи и телеконтроля, а также уменьшать межсимвольные искажения второго рода.

Величина непрерывной составляющей на фиксированной частоте. Эта величина представляет интерес в зависимости от того, какая дискретная составляющая выделяется для системы синхронизации.

Ширина полосы ΔF , содержащая 90% энергии элементарного импульса линейного кода. Этот параметр характеризует удельную часть непрерывной части энергетического спектра на тактовом интервале T .

Эффективность линейного кода по энергетическим затратам. Этот параметр характеризует энергетические затраты оптических передатчиков при выбранном коде и потери мощности за счет отклонения от оптимальной формы оптического сигнала. С этой точки зрения достоинствами выбранного кода являются экономия мощности и увеличение ресурса лазера ПОМ.

Коэффициент относительной помехоустойчивости. Он показывает, на какую величину потенциальная помехоустойчивость цифрового сигнала отличается от предельной помехоустойчивости:

$$K_n = 10 \lg \frac{P_3}{P_{3 \max}} \quad (5.7)$$

где P_3 — эквивалентная потенциальная помехоустойчивость рассматриваемого кода; $P_{3 \max}$ — предельная эквивалентная потенциальная помехоустойчивость цифрового сигнала.

Вне зависимости от конкретных условий реализации линейного тракта ВОСП сравнение цифровых сигналов удобно производить по потенциальной помехоустойчивости при идеальных условиях, которая зависит от эквивалентной мощности P_3 элементов этого сигнала $S_i(t)$ и $S_j(t)$, т. е.

$$P_3 = \frac{1}{T} \int [S_i(t) - S_j(t)]^2 dt \quad (5.8)$$

Очевидно, что предельной помехоустойчивостью будут обладать сигналы, элементы которых противоположны и удовлетворяют равенству $S_i(t) = -S_j(t)$. В оптических системах передачи противоположными являются сигналы, которые состоят из элементов высокого (положительного) уровня $S_i(t)$ и низкого (нулевого) уровня $S_j(t)$. Учтем также тот факт, что при оптимальном приеме достоверность приема тем выше, чем больше энергия сигнала.

5.3. Классификация кодов

Применяемые для ВОСП линейные коды условно можно разделить на две группы: коды со случайной последовательностью символов и коды с квазислучайной последовательностью символов (скремблированные бинарные коды) (рис. 5.1). В свою очередь, первую группу можно разделить на несколько подгрупп [2—12].

К безыбыточным кодам относятся линейные коды NRZ-L (абсолютный NRZ код) и относительные NRZ-M, NRZ-S коды. Информационные импульсы этих кодов имеют длительность T , при этом «1» — активная длительность и «0» — пауза, простирающаяся на весь тактовый интервал ($T_1 = T_0$). Очевидно, что скорость передачи в линии при передаче этих кодов не изменится.

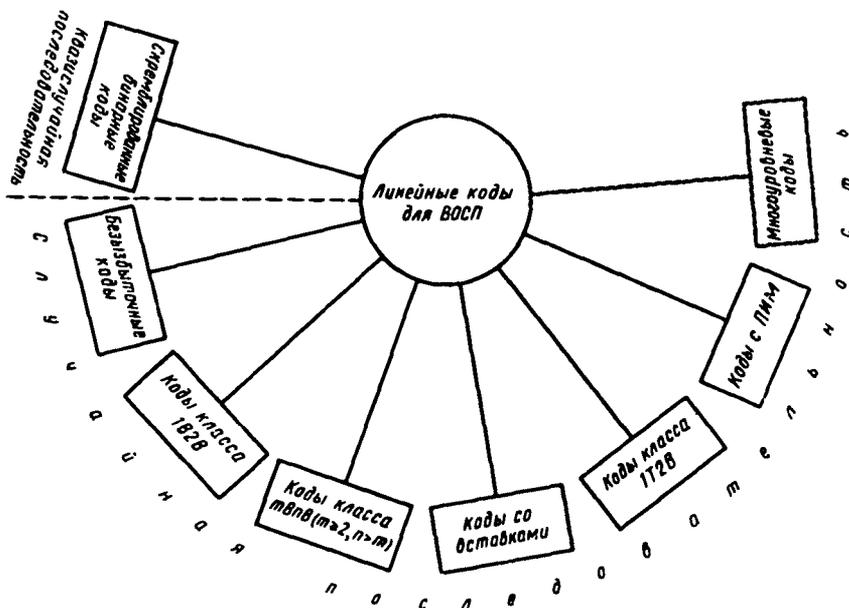


Рис 51 Классификация линейных кодов для ВОСП

Под линейными кодами класса 1В2В понимают коды, в которых осуществляется преобразование одного бита исходного ИКМ-сигнала длительностью T в комбинацию из двух символов, каждый из которых имеет длительность $T/2$ (следовательно, тактовая частота линейного сигнала вдвое больше тактовой частоты исходного ИКМ сигнала и скорость передачи в линии в 2 раза выше скорости исходной последовательности).

Двоичное основание счисления, используемое как в исходной, так и в преобразованной последовательности, обозначается латинской буквой В (Vinaгу). Заметим, что единой системы наименований линейных кодов не отработано, и ниже применяются обозначения, которые сравнительно широко используются в литературе. К линейным кодам класса 1В2В относятся В1Л (бинимпульсный абсолютный), ДВ1 (дифференциальный бифазный), В1М (относительный тип М), В1S (относительный типа S) EP 1 (электронно-фотонный типа 1), EP-2 (электронно-фотонный типа 2), Миллера, СМ1 (код с обращением), Радева—Стоянова

К классу блочных кодов тВпВ с $t \geq 2$ принадлежит большое число различных линейных кодов, алгоритмы формирования которых обычно даются кодовыми таблицами (алфавитами). Чаще всего используются две кодовые таблицы, что позволяет обеспечить равенство (балансирование) числа «1» и «0» в коде. В кодах этого класса последовательность исходного ИКМ-сигнала разбивается на отрезки (блоки), состоящие из t бит, и каждый из них преобразуется в определенную последовательность (блок) кодовых символов (из p бит). К кодам этого класса относятся коды 2В3В, 2В4В, 3В4В, 5В6В и др.

Отдельно выделяются коды со вставками (тВ1С, тВ1Р, ДмВ1М). При формировании кодов тВ1С к информационным символам добавляется один дополнительный (инвертированный символ-вставка), обозначаемый С. Если последний переданный символ является «1», то символ С примет значение «0», если же t й символ имел значение «0», то символ С примет значение

«1» Используются следующие коды этого класса 3В1С, 8В1С и др. При $m=1$ как частный случай получается бимпульсный код В1-Л класса 1В2В, который можно записать в виде 1В1С

В кодах $mВ1Р$ ($mВР$) m — число информационных символов, $Р$ — дополнительный символ. Если число единиц в блоке из m символов нечетное число, то символ $Р$ принимает значение «1», если четное, то символ $Р$ принимает значение «0». Наиболее часто из кодов $mВ1Р$ используются коды 10В1Р, 17В1Р, 24В1Р. Иногда в обозначениях символ $Р$ отсутствует, и тогда можно записать $mВnВ$. Например, коды 10В1Р и 17В1Р запишутся соответственно 10В11В, 17В11В.

Если требуется выявить ошибки в линейном коде и одновременно обеспечить служебную связь, то исходная двоичная последовательность кодируется по правилам алгоритма кода $mВ1Р$ (проверка на четность), а затем добавляется еще один бит $-R$ для служебной связи. Получается линейный код $mВ1Р1R$ (например, 10В1Р1R). Если кроме обнаружения ошибки требуется устранять последовательности одинаковых символов, то исходная двоичная последовательность кодируется по правилам алгоритма кода $mВ1Р$, а полученный код кодируется по алгоритму кода $mВ1С$. В результате получаем линейный код $mВ1Р1С$.

В кодах $DmВ1М$ к информационным символам бит вставка в виде единицы добавляется после каждого блока, а затем полученный код перекодирован методом относительного кодирования. Получается дифференциальный биполярный код с одной вставкой. Применяются следующие коды такого типа D3В1М, D5В1М, D7В1М, D10В1М, D15В1М. Ниже более подробно рассмотрены наиболее применяемые в высокоскоростных ВОСП коды $mВ1С$ и $DmВ1М$.

Коды класса 1Т2В используются в случаях, когда ВОСП сопрягается с существующим оконечным оборудованием проводной связи. Ввиду того, что по правилам МККТТ не разрешается вносить какие-либо изменения в оконечное оборудование, возникает задача перекодирования квазитрочичных трехуровневых сигналов в двухуровневые.

Особенностью линейных сигналов с позиционно импульсной модуляцией (ПИМ) является то, что для передачи m бит исходной информационной последовательности используются разрешенные комбинации с единственным импульсом, временное положение (позиция) которого соответствует передаваемой исходной кодовой комбинации. Применению кодов с использованием ПИМ сопутствует ряд трудностей технического характера, особенно при больших значениях m . Поэтому эти коды не нашли практического применения в ВОСП.

Успехи в лазерной технологии сопровождаются улучшением линейности модуляционных характеристик лазерных диодов в основном при применении цифровых методов передачи, что приводит к возможности использования многоуровневых кодов в будущем. Многоуровневые коды могут быть применены для уменьшения быстродействия систем, особенно на одномодовых ОК. Для многомодовых ОК они могут быть использованы при относительно малых затуханиях, высоких скоростях передачи (140 Мбит/с и больше) и больших значениях дисперсии. В настоящее время многоуровневые коды имеют существенно худшие показатели, чем двоичные при малых значениях дисперсии ОК. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены только двухуровневые коды.

5.4. Алгоритмы формирования кодов

5.4.1. Безызбыточные коды и коды класса 1В2В

При рассмотрении вопроса формирования алгоритмов кодов класса 1В2В удобно принять, что элементарные импульсы имеют прямоугольную форму и их длительность T или $T/2$ (за исключением кода RZ-25%, в котором длительность элементарного импульса равна $T/4$). Заметим, что элемен-

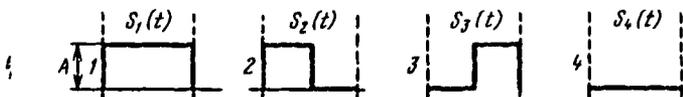


Рис 5.2 Элементы видеоимпульсных сигналов линейного тракта ВОСП

тарные импульсы в линии заметно отличаются от идеальной прямоугольной формы и их часто аппроксимируют в виде гауссовской, трапециевидной и других форм. В этих кодах передний фронт импульсов совпадает с границей либо серединой тактового интервала.

В ВОСП, когда код в линии представляет собой двухуровневый сигнал с амплитудой A , возможное число разнотипных элементов видеоимпульсных сигналов равно четырем (рис 5.2)

При передаче «1» и «0» исходной информации можно использовать комбинации любых элементов видеоимпульсного сигнала. Тогда число двоичных сигналов, составленных из элементов $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$ (рис 5.2), $C_n^2=6$. Таким образом, линейный код в зависимости от алгоритма формирования состоит из сочетания элементов $S_1(t)$ и $S_2(t)$ [см ф-лу (5.8)].

Формировать в кодере линейный код из элементов $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$ можно абсолютным или относительным методом преобразования. При абсолютном методе устанавливается однозначное соответствие между элементами линейного кода и элементами исходной последовательности, т. е. «1» и «0» исходной последовательности представляются соответственно верхним и нижним уровнями сигнала. При относительном методе формирования значение данного элемента линейного кода обусловлено значением элемента исходной последовательности и одним из предшествующих элементов этой же последовательности. Например, символу «1» соответствует повторение предыдущего элемента сигнала (сохранение состояния, уровня), символу «0» — появление альтернативного сигнала (переход на другой уровень, изменение состояния). Возможно и наоборот — повторение предыдущего элемента соответствует символу «0», а появление альтернативного сигнала — символу «1». Исходя из этого число относительных двоичных символов также равно шести.

Диаграммы формирования безызбыточных кодов и кодов класса 1B2B представлены на рис 5.3. Сигналы, приведенные на рис 5.3, а—в, отражают варианты безызбыточного кодирования заданной последовательности. В таких кодах все комбинации допустимы, поэтому обнаружение ошибок в работе регенератора по его выходному сигналу исключено. Эти сигналы обозначаются буквами NRZ (код без возвращения к нулю — Non Return To Zero). В первом варианте кодирования (рис 5.3, а) «1» и «0» исходной последовательности представляются соответственно верхними и нижними уровнями сигнала. Такое кодирование называют абсолютным и обозначают буквой L. По существу, безызбыточный код типа NRZ L является первичным кодом (ИКМ сигналов). Во втором варианте кодирования (рис 5.3, б) символу «1» исходной NRZ-L последовательности соответствует повторение уровня предыдущего элемента (сохранение состояния) в последовательности преобразованного сигнала, символу «0» — появление альтернативного уровня (состояния) по отношению к предыдущему элементу в последовательности преобразованного сигнала. Такой код называется относительным и обозначается буквой S (NRZ-S). Третий вариант относительного кода, в котором сохранение состояния соответствует символу «0», а изменение состояния — символу «1», обозначают буквой M (NRZ M).

В отличие от безызбыточных кодов типа NRZ при формировании кода RZ-50% (RZ Return To Zero) (рис 5.3, г) для защиты от межсимвольных помех между элементами сигнала формируют защитные промежутки. Длительность импульса выбирают равной $T/2$. Этот код можно рассматривать как избыточный двоичный код с тактовой частотой, равной $f_T, \lambda=2/T$, в котором из четырех возможных двоичных блоков 00, 01, 10 и 11 кодов класса 1B2B используются только два — 00 и 10.

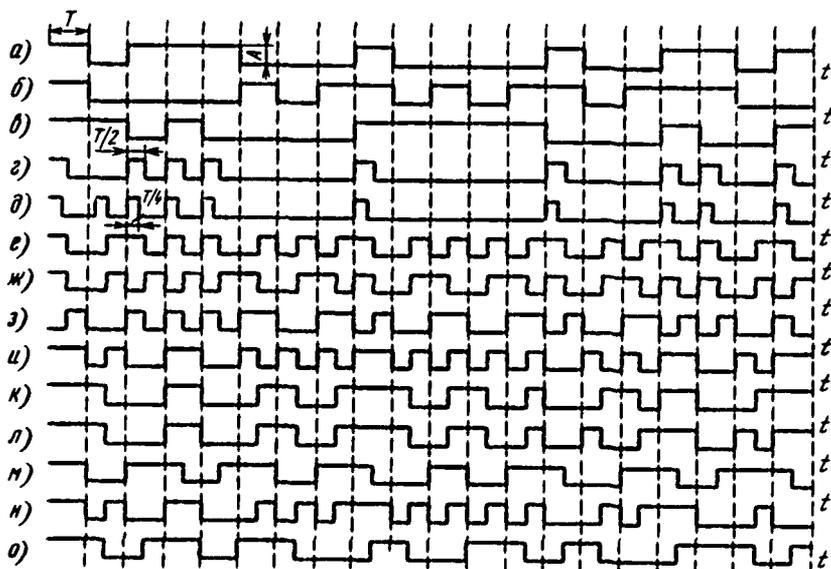


Рис 53 Диаграммы формирования безызбыточных кодов и кодов класса 1B2B

a — NRZ-Z; *б* — NZZ-S; *в* — NRZ-M; *г* — RZ-50%; *д* — RZ-25%; *е* — BIL; *ж* — DBI; *з* — BI-M; *и* — BI-S; *к* — EP-1; *л* — EP-2; *м* — Миллера; *н* — CM1; *о* — Радева—Стоянова

Код RZ-25% (рис. 5.3, *д*) введен в диаграмму формирования кодов условно. Этот код длительностью импульса $T/4$ не нашел широкого применения в ВОСП из-за увеличения полосы в 4 раза по сравнению с исходным двончным кодом.

На рис. 5.3, *е—и* приведены коды, имеющие ряд общих свойств. В частности, из диаграмм видно, что в этих кодах исключается возможность появления более двух импульсов одного уровня подряд. Код, представленный на рис. 5.3, *е*, получил название абсолютного бимпульсного кода и обозначается BI L (Biphase-Level). В этом коде исходные символы «1» и «0» представляются соответственно блоками линейного кода 01 и 10 (возможно и наоборот). На рис. 5.3, *ж* представлен дифференциальный бифазный код DBI (Differential Biphase). Правило кодирования состоит в том, что символ «1» исходной последовательности представляется блоком 01 (либо 10). При этом отсутствует переход блока 01 (или 10) в альтернативное состояние (повторяется блок предшествующего состояния). Этот переход соответствует символу «0» исходной последовательности (формируется блок, отличный от предшествующего).

Алгоритмы относительного кодирования BI-M (BI Mark) и BI S (BI Space) представлены на рис. 5.3, *з, и*. Для обоих кодов общим является наличие перехода «1» в «0» либо «0» в «1» в начале каждого блока независимо от передаваемого символа исходной последовательности. Например, в коде BI M формируется переход 01 (либо 10) в середине блока при передаче «1» исходной последовательности и отсутствие перехода при передаче «0». Код BI S отличается тем, что переходы 01 (либо 10) в середине блоков соответствуют передаче «0», а отсутствие таких переходов — передаче символов «1» исходной последовательности.

Правило формирования электронно-фотонного кода типа 1 (EP-1), приведенного на рис. 5.3, *к*, заключается в следующем: символы «1» исходно-

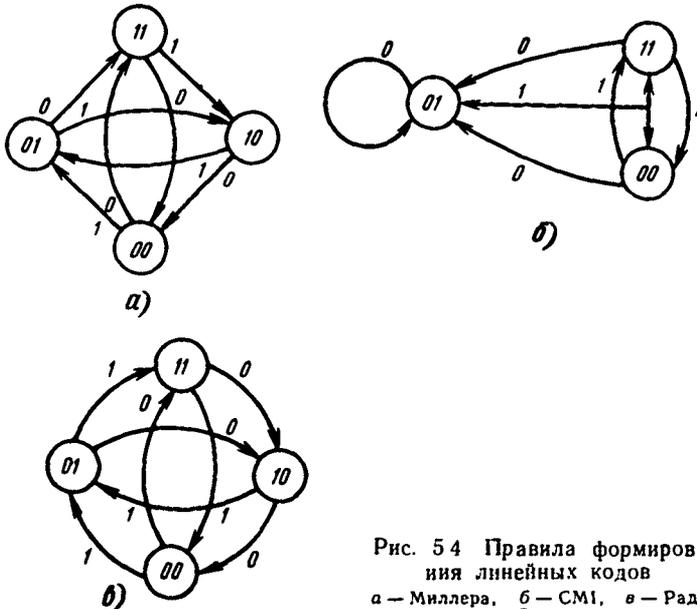


Рис. 54 Правила формирования линейных кодов
 а — Миллера, б — СМІ, в — Радева—Стоянова

го кода кодируются поочередно блоками 11 и 00, а символы «0» — блоком 01 либо 10, но так, чтобы первый символ блока не отличался от последнего символа предшествующего блока. По аналогичному алгоритму формируется электронно-фотонный код типа 2 (EP-2) (рис 5.3, л). Здесь, как и прежде, символы «1» исходной последовательности поочередно кодируются блоками 11 и 00, а символы «0» независимо от вида этих блоков кодируются поочередно блоками 10 и 01.

На рис 5.3, м приведены временные диаграммы кода Миллера, а на рис. 5.3, н представлен код СМІ (Coded Mark Inversion), в котором символы «1» исходной комбинации передаются чередующимися блоками 11 и 00, а символы «0» — одним из блоков 01 и 10

На рис 5.3, о приведена диаграмма формирования кода Радева—Стоянова. Правила формирования линейных кодов Миллера, СМІ и Радева—Стоянова приведены в виде графов на рис. 5.4.

5.4.2. Коды класса mBnB

Блочные коды имеют либо постоянную, либо переменную длину, причем в ВОСП обычно используются коды с постоянной длиной. Формирование блочных кодов с постоянной длиной $mBnB$ ($m \geq 2, n > m$), где, как правило, $n = m + 1$ (реже $n = m + 2$), представляется кодовыми таблицами (алфавитами). Избыточность в кодах используется для получения нужных характеристик кода, но за счет увеличения скорости передачи символов и оптических потерь. В основном используются блочные (алфавитные) коды с проверкой на четность или со взвешенным кодированием. В первом случае к группе из m символов исходной двоичной последовательности NRZ-L добавляется один контрольный символ «1» или «0» так, чтобы сумма элементов новой комбинации $n = m + 1$ содержала четное число единиц. Одиночные ошибки в этом случае обнаруживаются при нарушении четности контролируемой комбинации.

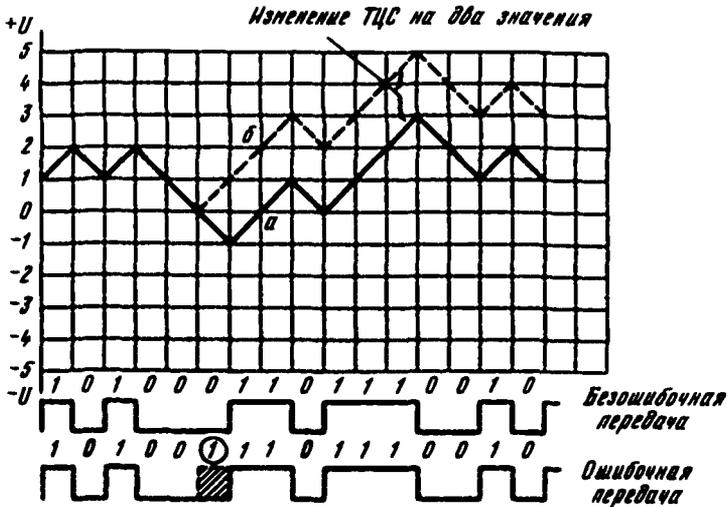


Рис 55 Обнаружение ошибок по превышению ТЦС в коде 3В4В

При взвешенном кодировании все комбинации из t символов исходного двоичного кода общим числом 2^m разбивают на две группы. Обе комбинации в группе кодируются блоками $n > t$, однако в комбинации первой группы содержится равное и постоянное число единичных элементов n_E (комбинации с равным весом $H = n_E$). Комбинации второй группы (оставшиеся комбинации исходной последовательности) кодируются поочередно в блоки линейного кода с неравным весом $H = n_E + l$ (прямые блоки) и в блоки с весом $n = n_E - l$ (инверсные блоки) так, что средняя плотность единичных посылок в последовательности остается постоянной и равной n_E/n , где l принимает значения 0,1

Блочные коды этого класса позволяют контролировать ошибки по ТЦС без декодирования линейного кода

Таблица 51

3В	4В					
	1-й алфавит			2-й алфавит		
	Плюсовая диспаратность	Нулевая паритетность	Минусовая диспаратность	Минусовая диспаратность	Нулевая паритетность	Плюсовая паритетность
000		0101		0100		1011
001		1101			0011	
010	1110		0100		0101	
001	1101		1000		0110	
100	0111		0010		1001	
101	1011		0001		1010	
110		0110			1100	
111		1010		0010		1101

Для контроля ошибок по ТЦС удобно принимать $N = n_{\Sigma} = n/2$ с равенством (паритетом) числа единиц и нулей в комбинациях первой группы. Комбинация второй группы имеет вес $N > n/2$ ($N = n_{\Sigma} + 1$) положительной диспаратности и $N < n/2$ ($N = n_{\Sigma} - 1$) отрицательной диспаратности. В длинной последовательности они компенсируются.

Алфавит кода ЗВ4В приведен в кодовой табл. 5.1.

Кодовые слова в блочных кодах выбирают и группируют так, чтобы уменьшать текущую диспаратность, максимальное число последовательных одинаковых символов, спектральную плотность непрерывной части энергетического спектра сигнала в области нижних частот.

На рис. 5.5 приведен пример для обнаружения ошибки по методу проверки границ ТЦС для кода ЗВ4В. При появлении ошибочного символа в комбинации исходного двоичного сигнала происходит превышение максимально возможной ТЦС (в этом коде максимальная ТЦС равна трем); одна ошибка приводит к изменению ТЦС на два значения — двойное превышение порога U_{Σ} . На рис. 5.5 изображены кривые безошибочной (а) и ошибочной (б) передачи.

5.4.3. Коды со вставками (дополнительным вводом)

На высоких скоростях передачи использование кодов 1В2В и mBnB усложняется; в этом случае наиболее подходящими являются коды со вставками.

Рассмотрим линейный код mB1C. Кодирование mB1C выполняется введением одного добавочного бита после каждого исходного блока из m бит. Этот бит-вставка называется С-битом. В результате кодирующий формат будет называться mB1C (т. е. бинарный код с добавочной вставкой). Этот дополнительный импульс предупреждает длинные последовательности единиц и нулей, поскольку вставляемый импульс принимает значение, инвертированное к предыдущему, т. е. к m -му, импульсу. Последовательность сигналов линейного кода mB1C ($m=5$) показана на рис. 5.6. На место «1» или «0» помещается С-вставка, когда в исходном сигнале соответственно имеется «0» или «1».

Схемы кодера и декодера для формирования линейных кодов mB1C приведены соответственно на рис. 5.7, а, б.

Для снижения избыточности кода значение m следует увеличить, но при этом увеличивается максимальное число одинаковых символов, которое в коде mB1C имеет место, когда бит-вставка и следующие за ней символы имеют одинаковые уровни. Таким образом, максимальное число последовательных идентичных символов $l_{\max} = m + 1$. С помощью этого кода легко выделить тактовую частоту из сигнала в приемной цепи. При этом будет достигнута наименьшая линейная скорость. Кроме того, в коде обеспечивается одно из требований, предъявляемых к линейным кодам, — наличие произвольной случайной последовательности в линии.

Код DmB1M является усовершенствованным кодом mB1C. Рассмотрим

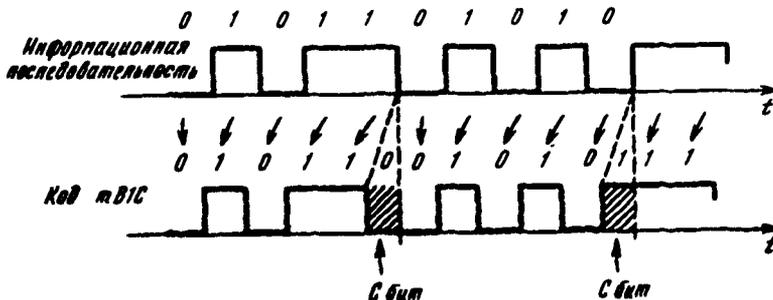


Рис. 5.6. Последовательность сигналов линейного кода mB1C

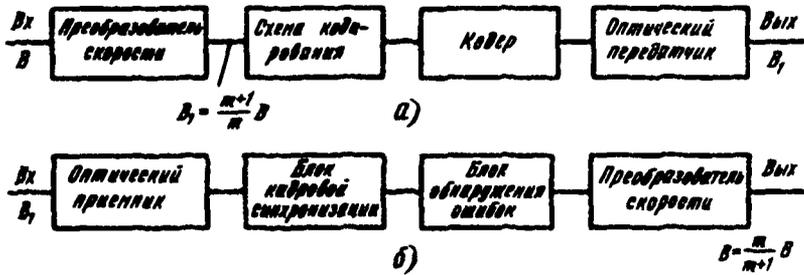


Рис. 5.7. Схемы кодера (а) и декодера (б) для формирования линейного кода $mB1C$

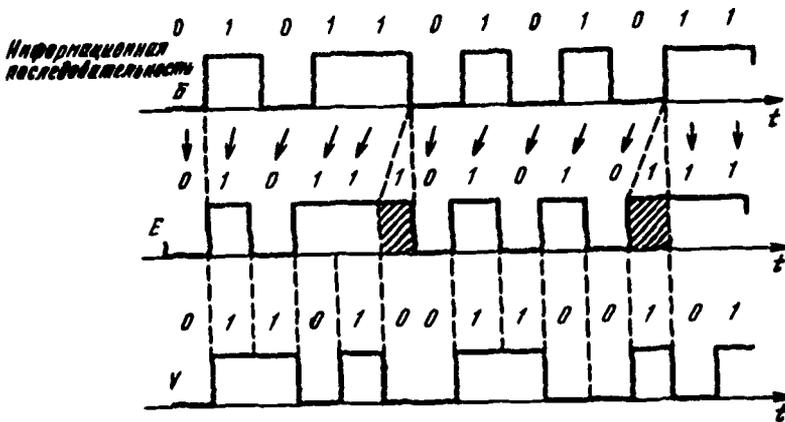


Рис. 5.8. Последовательность сигналов кода $DmB1M$

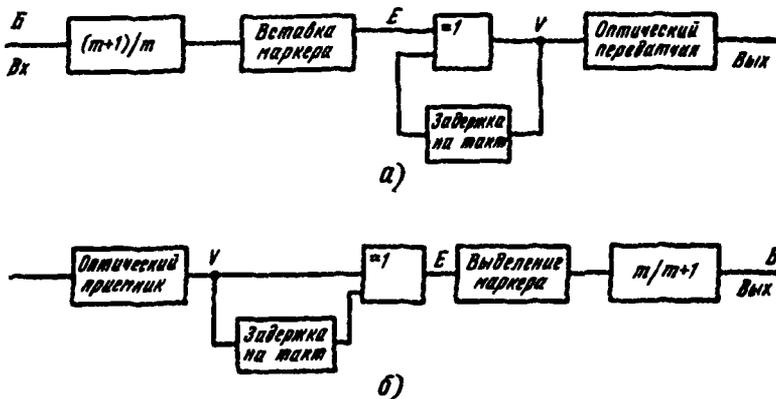


Рис. 5.9. Схемы кодера (а) и декодера (б) для формирования кода $DmB1M$

алгоритм кодирования сигналов кода DmB1M. Через каждые m бит исходного B сигнала (рис. 5.8) вставляется маркер-единица (mB1M-кодирование), а потом полученная последовательность E перекодируется методом относительного кодирования и получается линейный сигнал V на выходе кодера. Наличие низкого уровня (нуль) в последовательности сигнала на выходе блока-вставки маркера (последовательность E на временной диаграмме) обеспечивает сохранение на том же интервале уровня предыдущего интервала в комбинации сигнала на выходе кодера (последовательность V на временной диаграмме). Наличие же высокого уровня (единицы) в последовательности E меняет уровень в том же интервале по сравнению с уровнем предыдущего интервала на выходе кодера (последовательность V). Таким образом, кодер работает согласно уравнению

$$V_k = V_{k-1} \oplus E_k, \quad (5.9)$$

где символ \oplus означает операцию суммирования «по модулю два». Декодер работает согласно уравнению

$$E_k = V_k \oplus V_{k-1}. \quad (5.10)$$

Схемы кодера и декодера линейного кода DmB1M приведены соответственно на рис. 5.9, а, б.

5.5. Анализ, сравнение и выбор кодов

В настоящее время МККТТ еще не разработаны рекомендации по выбору кодов для ВОСП. Существует лишь отдельный проект.

Приведенные выше требования к линейным кодам в некотором аспекте являются взаимосключающими и зависят от различных факторов. Только конкретные условия и состояния работы ВОСП определяют предпочтительность выбора одного из рассмотренных кодов. Отметим также, что нет четкого разграничения по использованию того или иного кода в данной ВОСП.

Для сравнения кодов используются как временные (ТЦС, НЦС, величина группирования пауз и др.), так и энергетические характеристики (ширина энергетического спектра, отношение величин мощностей дискретной и непрерывной составляющих энергетического спектра в полосе пропускания фильтра выделителя тактовой частоты, величина проигрыша по мощности избыточного кодирования по сравнению с непосредственной или скремблированной передачей и др.).

При рассмотрении структуры линейного кода легко заметить, что осуществить выделение ТЧ тем проще, чем больше число переходов уровня в цифровом сигнале, т. е. чем больше переходов «10» или «01», при которых синусоидальное колебание тактовой частоты легко «вписывается» в структуру кода. Если же в коде имеются длинные последовательности со значительным преобладанием одинаковых символов, спектр будет содержать НЧ составляющие, что затруднит обработку сигнала в приемных устройствах и регенераторах. Такой случай неизбежен при безызбыточном кодировании (NRZ-L, NRZ-S, NRZ-M). Достоинствами этих кодов являются простота, относительная узость спектра и высокая энергетическая эффективность. Однако такие коды характеризуются такими существенными недостатками, как высокий уровень НЧ составляющих, невозможность контроля ошибок, отсутствие дискретных составляющих в энергетическом спектре. Поэтому указанные линейные коды применяются редко лишь при небольших расстояниях связи. Для улучшения статистических свойств цифровых сигналов используют скремблирование исходного двоичного сигнала для превращения его в сигнал, близкий к случайному, имеющему биномиальное распределение вероятностей появления любой комбинации (при равновероятном появлении символов «1» и «0»).

Скремблирование осуществляют с помощью устройства, реализующего логическую операцию суммирования по модулю 2 исходной двоичной после-

довательности и преобразующего случайного сигнала, в качестве которого используются псевдослучайные последовательности (ПСП). Выбор ПСП, наиболее близкой к случайному цифровому сигналу, является достаточно сложной задачей. В качестве наиболее эффективных ПСП часто используется М-последовательности периода $N=2^n-1$ (где n — целое число), образованные полиномами вида $x^{15}+x^{14}+1$ ($n=15$) или $x^{10}+x^9+x+1$ ($n=10$).

К достоинствам скремблированного сигнала можно отнести:

непроизвольное появление серии нулей в линии после скремблирования определяется в соответствии с биномиальным законом вероятности появления одного символа и длиной серии;

возможность сквозной передачи скремблированного сигнала по сети связи по любым цифровым трактам, так как исходный двоичный сигнал скремблируется без преобразования в другой вид и выделяется только в приемном оборудовании оконечной станции;

стабильность скорости передачи по линии;

возможность достаточно точного расчета выделителя тактовой частоты (ВТЧ) регенераторов, поскольку может быть определена вероятность появления любой комбинации в коде,

уменьшение влияния статистических параметров исходного сигнала на фазовое дрожание цифрового сигнала.

К существенному недостатку скремблирования относится размножение ошибок при восстановлении сигнала в дескремблере на приемной стороне, что ограничивает область применения данного метода.

К достоинствам кодов класса 1B2B относятся: малое (2—4) число последовательных одинаковых символов; небольшие размеры схем кодера—декодера и хорошая сбалансированность.

К недостатку этих кодов относится увеличение скорости передачи (тактовой частоты) в 2 раза, что исключает их применение на высоких скоростях (рост скорости передачи создает трудности при реализации электронных схем в передающей и приемной частях ВОСП).

В табл. 5.2 приводятся некоторые характеристики безызбыточных кодов и кодов класса 1B2B.

Энергетические спектры безызбыточных кодов и кодов класса 1B2B приведены на рис. 5.10. При равных вероятностях появления «1» и «0» в исходном коде ($P_1=P_0=0,5$) спектры кодов NRZ-L, NRZ-S, NRZ-M, BI-L, BI-M, BI-S, DBI одинаковы.

Отметим, что ширина энергетического спектра кода (непрерывная составляющая) и величина дискретных составляющих во многом определяются статистикой исходной двоичной последовательности и формой элементарных импульсов линейного кода.

Блочные коды класса mBnB находят широкое применение в ВОСП на средних и высоких скоростях (третья и четвертая ступени иерархии ЦСП).

К недостаткам блочных кодов можно отнести сложность кодека, так как для их построения требуется блок памяти, что ограничивает их применение на высоких скоростях передачи. Кроме сложности построения схем кодека блочных кодов увеличение m приводит к задержкам в передаче и заметно усложняет кодирующие устройства.

Увеличение избыточности в кодах mBnB путем введения дополнительных символов (например, $n=m+2$) позволяет использовать комбинации с постоянной диспаритетностью и получить более простые алгоритмы кодирования, поскольку $S_n=1$, т. е. кодер имеет единственное состояние в конце каждого блока. Однако при этом увеличивается тактовая частота и ухудшаются условия контроля ошибок в регенераторе. При небольшой избыточ-

Таблица 52

Тип линейного кода	n/m	P_{1l}	l_{0max}	l_{1max}	ΔF
NRZ-L	1	—	∞	∞	$\frac{0,86}{T}$
NRZ-M	1	—	∞	∞	$\frac{0,86}{T}$
NRZ-S	1	—	∞	∞	$\frac{0,86}{T}$
RZ-50	1	0,5	∞	1	$\frac{1,72}{T}$
BI-L	2	0,5	2	2	$\frac{2,96}{T}$
BI-M	2	0,5	2	2	$\frac{2,96}{T}$
DBI	2	0,5	2	2	$\frac{2,96}{T}$
BI-S	2	0,5	2	2	$\frac{2,96}{T}$
EP-1	2	0,5	4	4	$\frac{1,52}{T}$
EP-2	2	0,5	4	4	$\frac{1,70}{T}$
СМI	2	0,5	3	3	$\frac{1,70}{T}$
Миллера	2	0,5	4	4	—
Радсва—Стойнова	2	0,5	4	4	—

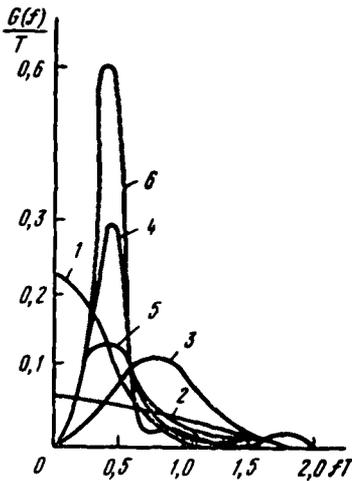
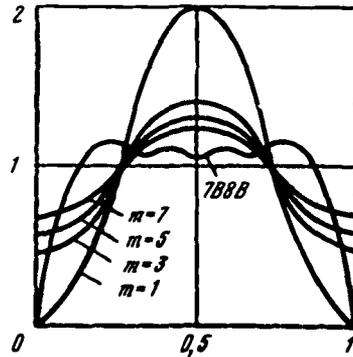


Рис. 5.10. Энергетические спектры безыбыточных кодов и кодов класса 1B2B:

1 — NRZ-L, NRZ-S, NRZ-M; 2 — RZ-50; 3 — BI-L, DBI, BI-M; 4 — BI-S (при $P_1 \neq P_0$); 5 — СМI; 6 — Миллера (при $P_1 = P_0 = 0,5$)

Рис. 5.11. Энергетические спектры линейных кодов $mVnB$, $mB1C$ и $Dm1M$ при различных m и n ($P_1 = P_0 = 0,5$)

ности число комбинаций с равным числом единиц и нулей недостаточно для кодирования всех 2^m символов.

Отметим, что в конкретном типе линейного кода класса $mBnB$ возможны варианты, различающиеся теми или иными свойствами. Например, в коде 7B8B контроль ошибок можно осуществить по признаку максимальной длины последовательностей одинаковых символов.

Некоторые характеристики блочных кодов приведены в табл. 5.3 [10].

Таблица 5.3

Линейный код	Кoeffициент различения ошибок	Возможность передачи сервисных сигналов	n/m	P_{14}	S_k	S_m	l_{max}	l'_{max}	(b_k)	Границы диспаритетности		$\Delta_{11}, \%$	$\Delta_{12}, \%$
										D	D'		
2B3B	—	—	1,5	0,33	2	8	7	3	0,33	+1	—	0,42	4,3
3B4B	1,5	Возможно	1,33	0,5	2	5	4	4	0,5	+3	+3	0,25	4,4
5B6B	2,5	»	1,2	0,5	2	9	6	4	0,5	+2	+4	0,5	5,2
5B7B	—	—	1,4	0,5	1	17	6	4	0,42	—1	—	0,2	4,0
6B8B	—	Возможно	1,33	0,5	—	7	6	6	—	0	+3	—	—
7B8B	3,5	»	1,14	0,5	—	15	6	6	—	+4	+7	—	—
9B10B	—	—	1,11	—	—	—	—	—	—	+4	+7	—	—
7B10B	—	—	1,43	—	—	—	—	—	—	0	+4	—	—
17B18B	—	—	1,058	—	—	1	34	—	—	—	—	—	—

Основные характеристики кодов $mB1C$, $DmB1M$, $mB1P$:

возможность применения в высокоскоростных ВОСП;

код $DmB1M$ в среднем имеет хорошо сбалансированную сигнальную последовательность;

размеры кодера и декодера обоих кодов сравнительно небольшие, так как правила их кодирования и декодирования несложные,

линейная скорость в кодах определяется по формуле

$$B_1 = [(m+1)/m]B, \quad (5.11)$$

где B — скорость передачи исходного двоичного кода;

если отношение меток к информационной последовательности равно 0,5, в обоих кодах содержится дискретная составляющая, если же отношение меток к информационной последовательности не равно 0,5, код $mB1C$ содержит гармонику спектра, а в коде $DmB1M$ гармоники отсутствуют;

линейный код $DmB1M$ успешно применяется в системах с фазовой модуляцией;

линейный код $mB1P$ позволяет осуществить контроль ошибок без прерывания связи;

если отношение меток к информационной последовательности равно 0,5, диаграммы кодов $mB1C$ и $DmB1M$ совпадают и спектральная плотность непрерывной составляющей энергетического спектра кодов одинакова. При малых значениях m ($m=1, 2, 3$) в кодах подавлены НЧ и ВЧ составляющие, а при больших значениях m ($m=6, 7, \dots$) спектральная плотность непрерывных составляющих приблизительно такая же, как у блочного кода типа 7B8B, и имеет широкую плоскую характеристику, хотя на высоких и низких частотах отмечается резкий спад. На рис. 5.11 приведены энергетические спектры линейных кодов $mBnB$, $mB1C$ и $DmB1M$ при различных m и n (при $P_1 = P_0 = 0,5$);

оба кода характеризуются высоким качеством подавления дрожания фаз. Это связано с тем, что в коде mB1C соотношение «1» и «0» близко к состоянию баланса, при этом чем меньше m , тем больше увеличивается этот эффект. Для обоих кодов особенно хороший результат для подавления дрожания фаз дает предварительное скремблирование информационного сигнала; контроль линейной ошибки в кодах mB1C и DmB1M осуществляется с помощью меток.

С точки зрения подавления размножения ошибок в кодах типа mB1C ошибки остаются в своих пределах, а в кодах типа DmB1M ошибка в одном бите вызывает еще одну ошибку; уровень интеграции в кодах со вставками высок.

Характеристики кодов со вставкой и блочных кодов приведены в табл. 54.

Таблица 54

Характеристика	Коды со вставками		Блочные коды
	mB1C	DmB1M	
Максимальное число одинаковых по уровню символов (0 или 1)	Хорошее	Хорошее	Хорошее
Баланс нулей или единиц	Средний	Хороший	Хороший
Уровень интеграции цепей кодера или декодера	Очень хороший	Очень хороший	Плохой
Обнаружение ошибок	Среднее	Среднее	Хорошее
Размножение ошибок	Хорошее	Среднее	Плохое
Расширение системы (расширение числа каналов)	Хорошее	Хорошее	Плохое
Коэффициент размножения ошибок	1	2	~3 (3B4B)
Подавление дрожания фаз	Хорошее	Хорошее	—

Предъявляемые требования к параметрам кодов для оценки их характеристик и анализ алгоритмов преобразования показывают, что вопрос о выборе линейного кода в линии не имеет однозначного решения для всех возможных вариантов ВОСП. Для каждой ВОСП необходим тщательный и всесторонний анализ временных и спектральных параметров линейных кодов с учетом технико-экономических факторов.

Для внутриобъектовых и городских ВОЛС на низких скоростях передачи (до 34 Мбит/с) наиболее рациональным является применение кодов класса 1B2B (B1-L, B1-M, CM1). Для более высоких скоростей передачи целесообразно применять блочные коды mBnB (2B3B, 3B4B, 5B6B).

Для зональных и магистральных сетей ВОСП выгоднее использовать блочные коды с меньшей избыточностью (7B8B, 17B18B), что усложняет окончное оборудование, но позволяет сэкономить полосу пропускания линейного тракта ВОСП. Для высокоскоростных магистральных ВОСП (до 140 Мбит/с), имеющих большую длину регенерационных участков, выбор линейного кода определяется компромиссом между сужением полосы передаваемых частот, содержанием хронизирующей информации в коде, допусками на межсимвольные искажения, а также возможностью контроля ошибок.

На скоростях передачи 140 и 565 Мбит/с наиболее перспективными являются коды со вставками mB1C, DmB1M, mB1P1C, mB1P1R с большими

значениями m , которые по сравнению с кодами класса $mBnB$ имеют ряд преимуществ, отмеченных выше.

В настоящее время блочные коды и коды со вставками применяются в основном на магистральных высокоскоростных ВОСП с кабелями на одномодовом оптическом волокне.

В табл. 5.5 приведены некоторые данные линейных трактов ВОСП, разработанные у нас и за рубежом

Таблица 5.5

Страна, фирма	Наименование ВОСП	Скорость передачи информации, Мбит/с	Тип кода в линии	Тип волокна
СССР	«Соната-1»	2,048	CMJ	М*)
	«Соната-2»	8,448	5B68	М
	«Сопка-2»	34,368	5B68	М
	«Сопка-3»	139,264	10B1P1R	О**)
	«Сопка-4»			
Франция, CIT-Alcatel	TF-34	34	CMJ	О
	TF-34	34	5B6B	»
	TF-140	140	5B68	»
Великобритания, STS	—	140	788B	О
Нидерланды, Philips	8TR681	2,048	1B2B	О
	8TR682	8,448	1B2B	»
	8TR683	34	5B68	»
	8TR684	140	5B68	»
ФРГ, Siemens	LA1406GF	140	586B	О
	LA5656GF	565	5B68	»
Швеция, Ericsson	ZAM-140-2	140	5B68	М
	ZAM-140-3	140	5B68	О
Япония, NTT	F-6M	6,312	CMJ	М
	F-32M	32,064	CMJ	»
	F-100M	97,728	8B1C	О
	F-400M	347,2	10B1C	О
	ZAM-565-1	565	17B18B	»
Япония, KDD	Подводные ВОСП			
	FS-100M	97,728	8B1C	О
	FS-400M	347,2	10B1C	»
	OS-280M	280	Скремблированный бинарный	»
США	—	280	24B1P	О

Глава 6

Волоконно-оптические системы передачи

6.1. Общие принципы построения ВОСП

Под системой передачи Единой автоматизированной сети связи (ЕАСС) понимается совокупность технических средств, обеспечивающих образование линейного тракта, типовых групповых трактов и каналов передачи первичной сети ЕАСС, состоящая из станций систем передачи и среды распространения сигналов электросвязи. Система передачи, предназначенная для передачи сигналов электросвязи цифровыми методами и в качестве среды распространения сигналов использующая оптическое волокно, называется цифровой волоконно-оптической системой передачи.

Волоконно-оптические системы передачи применяются на всех участках первичной сети ЕАСС для магистральной, зоновой и местной связи. Требования, которые предъявляются к таким системам передачи, отличаются числом каналов, параметрами и технико-экономическими показателями.

На магистральной и зоновых сетях применяются ЦВОСП, на местных сетях для организации соединительных линий между АТС также применяются ЦВОСП, а на абонентском участке сети могут использоваться как аналоговые (например, для организации канала телевидения), так и цифровые системы передачи.

Максимальная протяженность линейных трактов магистральных систем передачи составляет 830 км при средней длине порядка 500 км. Максимальная протяженность линейных трактов систем передачи внутризоновой первичной сети может быть не более 600 км при средней длине 200 км. Предельная протяженность городских соединительных линий для различных систем передачи составляет 80...100 км.

На рис 6.1 приведена обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи. В качестве оконечной каналообразующей аппаратуры используется аппаратура многоканальных систем передачи с частотным (ЧРК) или временным (ВРК) разделением каналов. Применение многоканальных систем передачи с ЧРК связано с определенными трудностями обеспечения требуемой помехозащищенности, особенно в части реализации требований к допустимым нелинейным переходным помехам. При выполнении этих требований длина усилительного участка оказывается соизмеримой с длиной усилительного участка (3...6 км) многоканальных систем передачи на симметричных или коаксиальных кабелях, поэтому их применение на сети ЕАСС оказывается нецелесообразным по технико-экономическим показателям.

Известно, что при передаче сигналов электросвязи цифровыми методами полоса частот на один канал тональной частоты увеличивается примерно в 15...20 раз. Одновременно увеличивается и помехозащищенность на 20...40 дБ. Коэффициент затухания оптического волокна не зависит от частоты в широкой полосе частот (для одномодовых волокон — до десят-

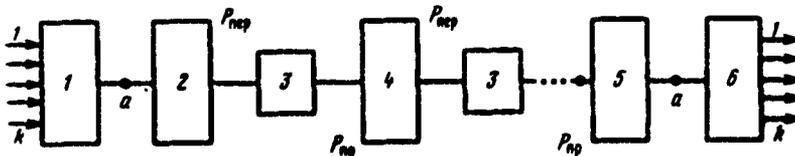


Рис 6.1. Обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи:

1, 6 — оконечная передающая и приемная аппаратура многоканальных систем передачи, 2, 5 — оконечная передающая и приемная аппаратура линейного тракта, 3 — оптический кабель, 4 — промежуточная аппаратура линейного тракта

ков гигагерц), увеличение полосы частот цифрового сигнала не приводит к заметному ухудшению технико-экономических показателей системы передачи, а высокая помехозащищенность позволяет увеличить расстояние между промежуточными пунктами в 10 . 15 раз. В связи с этим на общегосударственной сети связи во всех странах применяют цифровые волоконно-оптические системы передачи.

В настоящее время ЦВОСП создаются как сочетание волоконно-оптического линейного тракта (точки *a* на рис. 6.1) с унифицированной каналообразующей аппаратурой и аппаратурой группообразования цифровых систем передачи различных ступеней иерархии. Поэтому они имеют унифицированные параметры стыка, что позволяет без дополнительных согласующих устройств организовать комбинированные линии передачи, содержащие ЦВОСП и ЦСП с применением других сред распространения сигналов электросвязи.

Основные характеристики современных ВОСП определяются параметрами оконечной и промежуточной аппаратуры линейного тракта (2, 4 и 5 на рис. 6.1), а также параметрами волоконно-оптического кабеля. Наиболее существенной особенностью линейных трактов ЦВОСП является большая длина участка регенерации, которая определяется двумя факторами энергетическими соотношениями и дисперсионными искажениями.

В современных ЦВОСП энергетический потенциал \mathcal{E} , определяемый как разность между уровнем мощности оптического сигнала $P_{пер}$, введенного в волокно, и уровнем мощности $P_{пр}$ на входе приемного устройства, при котором коэффициент ошибок регенератора не превышает заданного значения, установленного для данной системы передачи, достигает 25 . 50 дБ. Это зависит от скорости передачи, технического уровня элементов электрооптических и оптоэлектронных преобразователей, длины волны используемого источника излучения и других факторов.

Энергетический потенциал определяет максимально допустимое затухание оптического сигнала в оптическом кабеле, в разъемных и неразъемных соединениях на участке регенерации, а также другие потери в узлах аппаратуры. Исходя из энергетических параметров передатчика, приемника и потерь в линии максимально допустимую длину участка регенерации можно определить из следующего выражения

$$L \leq \frac{\mathcal{E} - \mathcal{Z} - A_a}{\alpha_k + \alpha_c} \quad (6.1)$$

где α_k — коэффициент затухания оптического кабеля, $\alpha_c = A_c/l$ — удельные потери на стыках при неразъемном соединении строительной длины оптического кабеля (затухание соединения A_c , приведенное к одному километру); l — строительная длина оптического кабеля; A_a — дополнительные потери (3 . 5 дБ) в аппаратуре передачи и приема (разъемные соединители, устройства соединения линейного кабеля со станционным и др.); \mathcal{Z} — энергетический запас системы (6 . . . 10 дБ), необходимый для компенсации эффекта старения элементов аппаратуры и оптического кабеля, компенсации дополнительных потерь при ремонте оптического кабеля (стыки кабельных вставок) и других отклонений параметров участка в процессе эксплуатации.

Другим ограничивающим фактором при определении допустимой длины участка регенерации является дисперсия в оптическом волокне.

Как показано в гл. 2, в многомодовых волокнах оптический сигнал, модулированный по интенсивности, переносится направленными модами, которые имеют различные групповые скорости. Для оценки искажений в многомодовых волокнах используются амплитудные модуляционно-частотные характеристики $A(F)$, показывающие, как меняется амплитуда модулированного сигнала на выходе волокна в зависимости от модулирующей частоты F . Ширина полосы частот градиентных волокон намного больше, чем ступенчатых многомодовых. Это объясняется тем, что разность групповых скоростей направляемых мод в градиентных волокнах значительно меньше, что достигается выбором определенного профиля показателя преломления.

В реальных многомодовых волокнах распределение диэлектрической проницаемости отлично от оптимальной. Вследствие этого разность групповых скоростей возрастает и ширина полосы частот ΔF уменьшается. Для промышленных образцов оптических кабелей $\Delta F = 0,5 \dots 0,8$ ГГц·км.

С увеличением длины волокна полоса частот $\Delta F(L)$ уменьшается и для реальных градиентных волокон может быть приближенно определена из выражения

$$\Delta F(L) = \Delta F / L \gamma, \quad (6.2)$$

где ΔF — ширина полосы частот, приведенная к единице длины волокна (обычно на 1 км); $\gamma = 0,5 \dots 0,8$ — коэффициент, учитывающий влияние реального профиля показателя преломления и закон изменения полосы частот с увеличением длины волокна.

В табл. 6.1 приведены ориентировочные расчетные данные длины участка регенерации L , определенные на основании выражений (6.1) и (6.2) для градиентных волокон на различные диапазоны длин волн, а также ширина полосы частот в зависимости от длины волокна L для ΔF , равной 500 и 800 МГц·км (для удобства расчета принят нижний предел $\gamma = 0,5$).

Таблица 6.1

Длина волны, мкм	Коэффициент затухания волокна, дБ/км	Максимальная длина участка L , ограниченная энергетическим потенциалом, км	Ширина полосы частот волокна в зависимости от его длины $\Delta F(L)$, МГц·км	
			500	800
0,85	3	12	145	240
	5	8	180	290
1,3	0,5	45	75	110
	0,7	37	85	135
	1,0	30	90	145
1,55	1,5	20	110	175
	0,3	70	53	85

Из табл. 6.1 видно, что при больших значениях коэффициента затухания волокна (3...5 дБ/км) допустимая длина участка регенерации ограничена энергетическим потенциалом и составляет 12...8 км, а ширина полосы частот на этих длинах позволяет использовать системы передачи со скоростью 140 и 280 Мбит/с. С уменьшением коэффициента затухания волокна (на длинах волн 1,3 мкм и особенно 1,55 мкм) рабочая полоса частот градиентных волокон падает настолько, что безыскаженная передача возможна только на малых скоростях (8 Мбит/с и в некоторых случаях 34 Мбит/с).

Для систем передачи со скоростью 140 Мбит/с и выше градиентные волокна не удовлетворяют требованиям и должны применяться только одномодовые волокна. В одномодовых волокнах искажения сигнала зависят от параметров волокна, источника излучения и полосы частот модулирующего сигнала.

При оценке ширины полосы частот $\Delta F(L)$ одномодового волокна длиной L рассматриваются два случая:

1) ширина полосы частот источника излучения $\Delta F_{ист}$ больше ширины полосы частот ΔF_m модулирующего сигнала или $\Delta \lambda_{ист} > \Delta \lambda_m$, где $\Delta \lambda_{ист}$ и $\Delta \lambda_m$ — соответственно диапазоны длин волн, излучаемый источником излучения, и диапазон длин волн модулирующего сигнала. Для этого случая справедливо соотношение

$$\Delta F(L) = \frac{k}{\gamma \cdot \Delta \lambda_{ист} L}, \quad (6.3)$$

где k — коэффициент, зависящий от формы сигнала; τ — обобщенное значение дисперсии в одномодовом оптическом волокне (включая дисперсию мод, материальную и другие факторы, влияющие на искажения сигнала). Обычно измеренное τ (пс) приводят к единице длины волокна (на 1 км) и к единице ширины диапазона длин волн, излучаемого источником (на 1 нм), поэтому чаще всего дисперсию измеряют в пс/(нм·км).

Пример. Определить допустимую для безыскаженной передачи ширину полосы частот одномодового оптического волокна при длине волны $\lambda_{\text{ист}} = 1,3$ мкм, $\tau = 6$ пс/км·нм, $\Delta\lambda_{\text{ист}} = 2$ нм и гауссовской форме сигнала, для которой $k = 1,3$.

На основании выражения (6.3) для волокна длиной 1 км

$$\Delta F(1) = \frac{1,3}{6 \cdot 10^{-11} \cdot 2} \approx 10^{11} \text{ Гц} \cdot \text{км}$$

или полоса частот волокна длиной 1 км составляет 100 ГГц км. При длине волокна 50 км $\Delta F(50) = 2$ ГГц. Проверим, удовлетворяется ли начальное условие $\Delta\lambda_{\text{ист}} > \Delta\lambda_{\text{м}}$, если даже сигнал заполняет всю полосу частот оптического волокна:

$$\Delta\lambda_{\text{м}} = \frac{2 \cdot \Delta F_{\text{м}} \lambda^2}{c} = \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,3^2 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 10^8} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ м};$$

следовательно, $\Delta\lambda_{\text{м}} = 1,1$ нм и $\Delta\lambda_{\text{ист}} > \Delta\lambda_{\text{м}}$;

2) ширина полосы частот источника излучения меньше ширины полосы частот модулирующего сигнала, т. е. $\Delta F_{\text{ист}} < \Delta F_{\text{м}}$ или $\Delta\lambda_{\text{ист}} < \Delta\lambda_{\text{м}}$.

Для определения рабочей полосы частот одномодового волокна длиной L при указанном условии можно воспользоваться выражением

$$\Delta F(L) = \frac{k}{\tau \Delta\lambda_{\text{м}} \sqrt{L}}. \quad (6.4)$$

При распространении по оптическому кабелю, обладающему ограниченной шириной полосы частот и определенным затуханием, линейный сигнал, представляющий собой импульсную последовательность, искажается, изменяясь по форме и длительности, нарушаются тактовые интервалы, уменьшается их амплитуда и возникает межсимвольная интерференция. Дискретный сигнал превращается в квазинепрерывный. Для восстановления параметров сигнала в линии связи на определенных расстояниях друг от друга включают промежуточные регенерационные устройства.

В тех случаях, когда длина линии ограничивается энергетическим потенциалом, а по дисперсионным искажениям (или по полосе частот) имеется достаточный запас, для увеличения дальности связи на промежуточных станциях можно устанавливать оптические усилители, число которых (n) будет ограничено не только искажениями на общей длине оптического кабеля (nL), но и рабочей полосой частот оптического усилителя. Поэтому через определенное число усилителей устанавливают регенераторы. Такие системы называют «гибридными», так как на линии устанавливают и усилители, и регенераторы.

В тех же случаях, когда длина участка регенерации ограничивается дисперсионными искажениями, для увеличения дальности передачи необходимо в промежуточных пунктах устанавливать регенераторы, восстанавливающие форму сигнала и временные интервалы в передаваемой импульсной последовательности. В настоящее время еще не созданы элементы и устройства, работающие в оптическом диапазоне длин волн для обработки оптического сигнала, выделения тактовой частоты и формирования линейного сигнала. Поэтому в современных системах передачи эти функции выполняют электронные узлы (9) промежуточного регенератора (рис. 6.2). Цифровой линейный сигнал детектируется в приемной части регенератора фотоприемным устройством (8), после регенерации поступает на электрооптический преобразователь (10) и далее в оптический кабель (7) следующего участка.

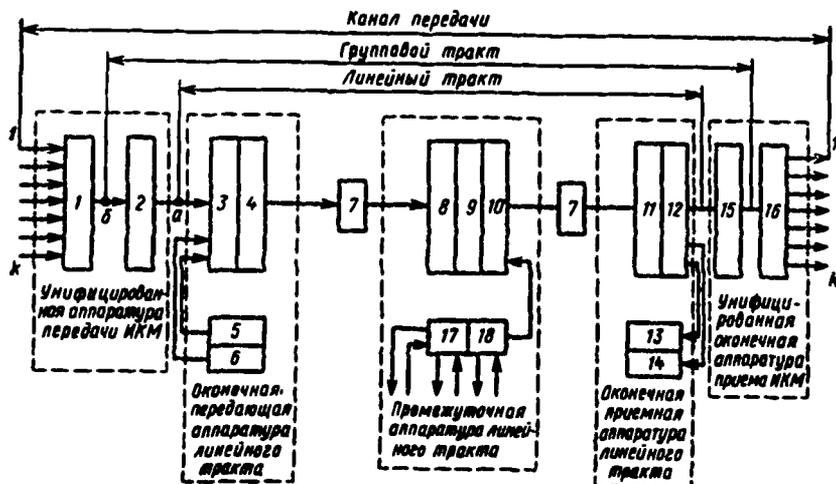


Рис. 6.2. Структурная схема цифровой волоконно-оптической системы передачи:

1, 16 — передающая и приемная аппаратура аналого-цифрового преобразования ИКМ; 2, 15 — передающая и приемная аппаратура временного группообразования; 3, 12 — устройства кодирования и декодирования группового сигнала; 4, 10 — электрооптические преобразователи оконечной и промежуточной аппаратуры линейного тракта; 7 — оптический кабель; 9 — электронный регенератор; 8, 11 — фотоприемные устройства; 5, 13, 17 — аппаратура служебной связи; 6, 14, 18 — аппаратура телемеханики

На конечных станциях ЦВОСП, как было указано выше, используется унифицированная многоканальная аппаратура ЦСП всех ступеней иерархии. Каналообразующая аппаратура ИКМ (1 и 16), а также аппаратура временного группообразования (2 и 15) имеет стандартные стыки в точках а и б. В соответствии с рекомендациями МККТТ G.703 для первой (скорость 2,048 Мбит/с), второй (скорость 8,448 Мбит/с) и третьей (скорость 34,368 Мбит/с) ступеней иерархии рекомендован трехуровневый код НДВ-3, алгоритм работы которого построен следующим образом (рис. 6.3, а). Единицы двоичного сигнала передаются импульсами чередующейся полярности с длительностью, равной половине тактового интервала. Когда передаются нули двоичного сигнала, если их не более трех, следующих друг за другом, импульсы на тактовых интервалах отсутствуют. Если в последовательности число нулей, следующих друг за другом, равно четырем, то они могут передаваться двумя способами: либо кодом 000У, где У означает импульс, сохраняющий полярность предыдущего импульса,

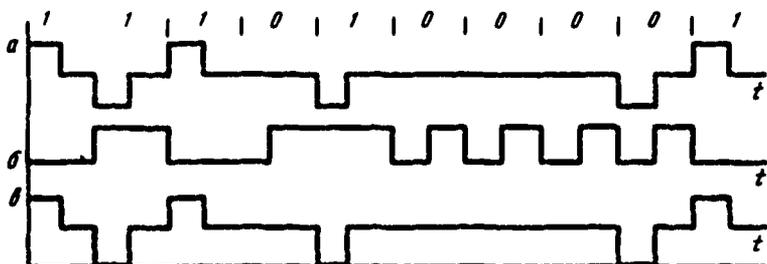


Рис. 6.3. Цифровые импульсные последовательности в различных кодах:
а — НДВ-3; б — СМ1; в — НДВ-3 в оптическом диапазоне

если со времени предыдущей комбинации 0000 прошло нечетное число единиц группового сигнала, либо кодом В00У, где В означает импульс, имеющий полярность, противоположную полярности предыдущего импульса, если прошло четное число единиц.

Для четвертичной ступени иерархии (скорость 139,264 Мбит/с) в качестве стыкового кода рекомендован код СМJ, алгоритм построения которого определен следующим образом (рис. 63,6) Символ «0» двоичного сигнала передается двумя символами 0 и 1, каждый из которых занимает половину тактового интервала Символ «1» исходного сигнала передается попеременно комбинациями 00 и 11 Частота следования стыкового сигнала в 2 раза больше частоты исходной последовательности, и поэтому код СМ1 принадлежит к коду типа 1В2В.

Применение кода НДВ-3 в линейном тракте ВОСП нецелесообразно, поскольку двухуровневый сигнал с переменной полярностью в электрических цепях превращается в трехуровневый в оптическом тракте (рис 53,8) и мощность сравнимых символов при принятии решения оказывается в 2 раза меньше, что эквивалентно уменьшению мощности передатчика в 2 раза Кроме того, специфика шумов фотоприемного устройства и других элементов вносит дополнительные потери в помехозащищенность В связи с этим в аппаратуре линейного тракта применяют преобразователи (см. узел 3 — рис. 62) кода НДВ-3 (для первых трех ступеней иерархии) в линейный код типа пВтВ и декодирующее устройство (12). Для четвертичной системы передачи отечественного производства также применяют преобразователи кода, так как хотя код СМJ и однополярный, но он увеличивает линейную скорость в 2 раза.

В первичной системе передачи (30 каналов ТЧ) используется бифазный код, во вторичной (120 каналов ТЧ), предназначенной для соединительных линий ГТС («Соната-2»), используется код СМJ; во вторичной и третичной (480 каналов ТЧ) системах, предназначенных для внутризональных сетей («Сопка-2» и «Сопка-3»), используется код 5В6В, а в четвертичной системе (1920 каналов ТЧ) — код класса ЮВ1Р1Р

Во всех случаях предусматривается система технического обслуживания (узлы 5, 6, 13, 14, 17, 18 рис 62), обеспечивающая контроль состояния и обслуживание линии и аппаратуры в процессе эксплуатации В ее состав входят

система телемеханики (телеконтроль и телеуправление), обеспечивающая телеметрический контроль качества передачи сигнала и технического состояния промежуточного оборудования и кабеля с оконечных станций, отображение результатов контроля, а также дистанционное управление различными устройствами переключения и коммутации,

система служебной связи, обеспечивающая проведение служебных переговоров между оконечными и любыми промежуточными станциями в процессе пуска-наладочных, ремонтных и профилактических работ,

система сигнализации

Для передачи сервисных сигналов используются свойства избыточности линейных кодов («Сопка-4») либо частотными методами уплотнения («Сопка-2» и «Сопка-3») в нижней части энергетического спектра информационной последовательности организуют дополнительные каналы сервисных систем

6.2. Технические характеристики отечественных ВОСП для соединительных линий ГТС

Для организации соединительных линий на ГТС имеются две цифровые системы передачи на 120 каналов тональной частоты «Соната-2» и ИКМ-4/5.

Система передачи «Соната-2» обеспечивает

передачу и прием сигналов цифрового потока со скоростью 8,448 Мбит/с, соответствующего требованиям ЕАСС при организации типовых цифровых каналов передачи и групповых трактов;

организацию 120 телефонных каналов, используемых в качестве соединительных линий между всеми типами АТС, стык с оборудованием формирования вторичных цифровых потоков; организацию автоматического технического обслуживания (телеконтроль, сигнализацию и служебную связь между оконечными и промежуточными станциями) по линейному тракту, предназначенному для передачи основного информационного потока.

В системе передачи «Соната-2» основные цифровые потоки передаются по однокабельной схеме (по одному оптическому волокну в каждом направлении передачи), при этом обеспечивается независимость работы всех систем передачи, работающих по одному кабелю. Включение, выключение или повреждение одной из них не вызывает перерывов или ухудшения качества работы других.

Информация о состоянии оборудования каждой станции и линейного тракта в целом передается по рабочим парам оптического волокна с перерывом связи вручную оператором при производстве настроечных работ или автоматически при аварийной ситуации. Одновременно можно контролировать девять промежуточных станций и две оконечные. В системе передачи «Соната-2» имеется возможность организовать три канала служебной связи. Один из них организуется между стойками вторичного временного группобразования (ВВГ) оконечных станций во вторичном цифровом потоке 8,448 Мбит/с. Второй канал образуется при подключении переносного аппарата служебной связи к паре оптических волокон и используется при проведении строительно-монтажных работ на линии. Третий канал организуется при наличии двухпроводной медной линии, проложенной вдоль оптического кабеля и подключенной к оборудованию служебной связи.

В комплексе аппаратуры не предусмотрены промежуточные регенераторы контейнерного типа, так как большая длина участка регенерации позволяет промежуточные станции стоечного типа размещать на АТС, расположенных вдоль трассы, и питать их от станционных батарей.

Система предназначена для работы на длине волны 0,85 мкм по оптическим кабелям на градиентных оптических волокнах с диаметрами сердечника 50 и оболочки 125 мкм.

Основные данные оптических кабелей системы «Соната-2» приведены в табл. 3.14. Основные характеристики системы «Соната-2».

Длина волны оптической несущей, мкм	0,85
Скорость передачи, Мбит/с	8,448
Число каналов ТЧ	120
Максимальное число промежуточных станций	9
Длина, км, регенерационного участка при затухании оптического кабеля 5 дБ/км.	
номинальная	7,5
максимальная	8,0
минимально проектная	4,0
То же, км, для оптического кабеля с затуханием, 3 дБ/км	
номинальная	11,0
максимальная	12,0
минимально проектная	6,0
Стыковой код с оборудованием ВВГ	НДВ-3
Линейный код	СМІ
Средняя мощность, Вт, оптического сигнала, вводимого в оптический кабель	10 ⁻³
Средняя мощность, Вт, оптического сигнала на входе приемной части оборудования	10 ⁻⁵ ... 10 ⁻⁸
Энергетический потенциал, дБ, не менее	50
Энергетический запас, дБ, не менее	6
Пределы регулирования АРУ (компенсация разброса длин участков регенерации), дБ	30

Коэффициент ошибок на один участок регенерации, не более	10 ⁻⁹
Электропитание от источника постоянного тока напряжением, В	-60±6

Для компенсации длин коротких участков предусмотрена автоматическая регулировка уровня в пределах 30 дБ.

Система передачи ИКМ-120-4/5 универсального типа предназначена для организации межузловых и межстанционных соединительных линий ГТС с использованием высокочастотных симметричных кабелей МКС-7×4×1,2, МКС-4×4×1,2 и волоконно-оптических кабелей. Она обеспечивает организацию 120 каналов ТЧ путем объединения четырех первичных потоков со скоростью 2,048 Мбит/с и организацию 60 каналов ТЧ при объединении 30 каналов первичной группы ЦСП и 30 каналов аппаратуры КАМА (с использованием аналого-цифрового оборудования АЦО-21 для преобразования группового сигнала с ЧРК в цифровой поток).

Электрические стыковые параметры (т. е. стык аппаратуры линейного тракта (ЛТ) с оборудованием временного группообразования) соответствуют ГОСТ 26886—86, при этом скорость передачи 8,448 Мбит/с, а стыковой код — НДБ-3. В линейном тракте используется также код МСМ1, увеличивающий линейную скорость передачи в 2 раза. На один участок регенерации коэффициент ошибок принят не более 10⁻⁹.

В системе имеется возможность использования двух типов источников излучения: светонизлучающих диодов (СД) для работы на сравнительно коротких участках регенерации и лазерного диода (ЛД). Кроме того, каждый из этих источников излучения может быть выбран для работы в диапазоне длин волны 0,85 или 1,3 мкм, в зависимости от конкретных условий и выбранного типа кабеля. Все эти четыре возможности обеспечиваются съемными взаимозаменяемыми кассетами линейного тракта (КЛТ), имеющими соответствующую маркировку (см. гл. 7).

Мощность, вводимая в волокно лазерными диодами, значительно больше, чем мощность, вводимая светодиодами. Поэтому и энергетический потенциал при использовании ЛД больше, чем при СД. Так, на длине волны 1,3 мкм энергетический потенциал при применении ЛД составляет 37 дБ, при применении СД 24 дБ, а на длине волны 0,85 мкм он составляет соответственно 50 и 34 дБ.

Для компенсации разброса длины участка регенерации предусмотрена автоматическая регулировка уровня в пределах 30 дБ.

Работоспособность оборудования оконечных и промежуточных станций контролируется с помощью устройств, расположенных на этих станциях.

Телеконтроль и служебная связь между промежуточными и оконечными станциями не предусмотрены; эти функции должны осуществляться с помощью центров технической эксплуатации ГТС.

Электропитание оконечного и промежуточного оборудования осуществляется от источников постоянного тока напряжением 60⁺⁶/₋₁₂ В, положительный полюс заземлен

Используемые типы оптических кабелей и их основные данные приведены в табл. 3.14. Основные параметры системы ИКМ-120-4/5:

Скорость передачи, Мбит/с	8,448
Число каналов ТЧ	120
Стыковой код с оборудованием ОВГ	НДБ-3
Линейный код	МСМ1
Коэффициент ошибок на один участок регенерации	10 ⁻⁹
Мощность оптического сигнала на выходе передающей части оборудования, дБм, при длине волны, мкм:	
1,3 (излучатель ЛД)	-3
1,3 (излучатель СД)	-16

0,85 (излучатель ЛД)	0
0,85 (излучатель СД)	-16
Минимальная мощность оптического сигнала на входе приемной части оборудования, дБм, при длине волны, мкм:	
1,3	-40
0,85	-50
Энергетический потенциал, дБ, не менее, при длине волны, мкм:	
1,3 (излучатель ЛД)	37
1,3 (излучатель СД)	24
0,85 (излучатель ЛД)	50
0,85 (излучатель СД)	34
Энергетический запас, дБ	6
Число промежуточных станций	9
Электропитание оконечных и промежуточных станций, В	60 ± 6
Потребляемый ток, А, при применении ЛД на:	
оконечной станции на длине волны, мкм:	
1,3	0,28
0,85	0,22
промежуточной станции на длине волны, мкм:	
1,3	0,48
0,85	0,43

Длина участка регенерации определяется на основании выражения (6.1). Энергетический запас принят равным 6 дБ. Максимально допустимая длина участка регенерации (даже при нижнем пределе коэффициента затухания 0,7 дБ/км) ограничена энергетическим потенциалом, так как применяемые градиентные волокна на длине волны 1,3 мкм не приводят к межсимвольным искажениям на этой длине участка регенерации. В табл. 6.2

Таблица 6.2

Тип кабеля	Длина волны, мкм	Тип излучателя	Максимальное значение коэффициента затухания кабеля, дБ/км	Максимальная длина участка, км	Минимальная длина участка, км
ОК-50-2-5	0,85	ЛД	5	8,0	4,0
		СД	5	4,5	0,5
ОК-50-2-3	0,85	СД	3	7,5	1,0
		ЛД	3	12,0	6,0
ОЗКГ-1-0,7	1,3	ЛД	0,7	29,0	6,0
		СД	0,7	16,0	0,0
ОЗКГ-1-1,0	1,3	ЛД	1,0	22,0	4,0
		СД	1,0	12,0	0,0
ОЗКГ-1-1,5	1,3	ЛД	1,5	16,0	3,0
		СД	1,5	9,0	0,0

приведены максимальные и минимальные значения длин участка регенерации при использовании кабелей типа ОК и ОЗКГ на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм.

К перспективным отечественным ЦВОСП для организации соединительных линий ГТС относится система передачи с использованием оборудования третьей ЦСП («Сопка-Г»). Предполагается, что эта система будет иметь две модификации, работающие в диапазоне длин волн 1,3 мкм по оптическим кабелям с многомодовыми градиентными волокнами и с одномодовыми волокнами. Как и в описанных выше системах, стыковой сигнал в ходе HDB-3 со скоростью передачи 34,368 Мбит/с преобразуется в лд-

нейный код МСМІ. Поэтому скорость передачи в линейном тракте в 2 раза больше и составляет 68,736 Мбит/с. В аппаратуре используются лазерные диоды, обеспечивающие уровень мощности в волокне —3 дБм. Для компенсации разброса длин участков регенерации предусматривается автоматическая регулировка входного уровня в пределах 13 дБ. Основные технические характеристики третичной ЦВОСП для ГТС:

Длина волны оптической несущей, мкм	1,3
Скорость передачи, Мбит/с	34,368
Число каналов ТЧ	480
Максимальная длина линейного тракта, км	90
Средняя мощность оптического сигнала, вводимая в оптический кабель, дБм	—3
Энергетический потенциал, дБ	38
Максимальная длина участка регенерации, км	30
Коэффициент ошибок регенератора	$1 \cdot 10^{-9}$

6.3. Технические характеристики отечественных ВОСП для внутризональных сетей

Для внутризональных сетей ЕАСС предусмотрены две цифровые волоконно-оптические системы передачи, обеспечивающие передачу вторичного цифрового потока со скоростью 8,448 Мбит/с («Сопка-2») и третичного цифрового потока со скоростью 34,368 Мбит/с («Сопка-3») по оптическому кабелю с многомодовыми градиентными волокнами. Первая из них дает возможность организовать 120 каналов ТЧ, а вторая — 480 каналов ТЧ методом импульсно-кодовой модуляции. Формирование стандартных первичных, вторичных и третичных цифровых потоков осуществляется унифицированным каналообразующим оборудованием ИКМ и оборудованием вторичного и третичного (ТВГ) группообразования. Их сопряжение между собой, а также с оборудованием линейного тракта определяется нормативными документами и рекомендациями МККТТ. Таким образом все стыковые параметры стандартизованы и являются едиными для всех цифровых систем передачи (код НДВ-3, скорость передачи на выходе ВВГ 8,448 Мбит/с и на выходе ТВГ 34,368 Мбит/с и т. д.).

Для передачи по оптическому линейному тракту эти сигналы преобразуются в линейный код типа 5В6В, поэтому скорость двоичных сигналов в линии увеличивается в 6/5 раза и становится для «Сопки-2» (вторичная цифровая система) 10,138 Мбит/с, а для «Сопки-3» (третичная цифровая система) 41,242 Мбит/с.

Среднее значение коэффициента ошибок для линии максимальной протяженности не должно превышать $2 \cdot 10^{-8}$. Как и для других систем передачи внутризональной сети ЕАСС, максимальная длина линейного тракта «Сопки-2» и «Сопки-3» составляет 600 км, а максимальное расстояние между обслуживаемыми пунктами 200 км.

Основные параметры и характеристики кабеля:

системы работают в диапазоне волн 1,3 мкм. В этом диапазоне коэффициент затухания оптических волокон значительно меньше, чем в диапазоне 0,85 мкм, и для волокон, применяемых в отечественных кабелях, составляет 0,7...1,5 дБ/км. Дисперсия на длине волны 1,3 мкм, как было указано в гл. 2, минимальная, так как имеет место компенсация разнополярных и равных составляющих — материальной и волноводной дисперсий;

широкополосность отечественных волокон достигает 500...800 МГц·км.

На основе этих оптических волокон промышленность выпускает оптические кабели типа ОЗКГ-1 для внутризональных сетей (ТУ 16.705.455—87). Они предназначены для прокладки в кабельной канализации, трубах, блоках и коллекторах, грунтах всех категорий, кроме подверженных мерзлотным деформациям, и в воде при пересечении неглубоких болот, несудоход-

объединение разнесенных по спектру информационного сигнала в линейном коде с сигналами сервисных служб (ТМ и СС)

Приемное ОЛТ производит обратное преобразование оптического сигнала в электрический в фотоприемном устройстве, разделение с помощью фильтров разнесенных по спектру информационного сигнала и сигналов сервисных служб, регенерацию линейного сигнала, а также преобразование линейного кода в трехуровневый стыковой код НДВ-3

В ОЛТ предусмотрено также устройство обнаружения ошибок в линейном сигнале, контроля и сигнализации состояния всего линейного тракта. Необслуживаемый регенерационный пункт размещается в унифицированном грунтовом контейнере и содержит устройства ввода оптического кабеля (УВК) и кабеля электропитания, линейный регенератор (ЛР), устройства телемеханики и служебной связи (УТМСС), устройство местного вторичного питания. Ввод кабелей в НРП осуществляется через вводно-кабельное устройство (УВК)

Допустимое значение наведенных ЭДС на цепи дистанционного питания составляют длительно 150 В, кратковременно 650 В, грозовой импульс 3 кВ

Приемно-передающие устройства ОЛТ на ОП и ОРП, а также линейный регенератор НРП обеспечивают энергетический потенциал, равный 43 дБ для систем «Сопка 2» и 41 дБ для системы «Сопка 3». Таким образом, в зависимости от коэффициента затухания оптического кабеля (см табл 3 14) длина участка регенерации для этих систем может составлять 20—30 км

Система телемеханики осуществляет сбор, передачу и отображение на каждом ОП информации о сигналах извещения, поступающих от всех датчиков или схем контроля, установленных на НРП, ОРП или ОП двух линейных трактов. На ОРП производятся сбор и отображение информации о состоянии датчиков или схем контроля только с НРП секции обслуживания данного ОРП — по четыре НРП, прилегающих с каждой стороны ОРП. Информация от среднего НРП двух соседних секций обслуживания поступает на оба ОРП. Оборудование телемеханики ОП рассчитано на обслуживание 33 пунктов, включая ведущий ОП с каждого НРП, ОРП и ОП может поступать до 16 сигналов извещения о состоянии датчиков. Предусмотренный в системе телеконтроля циклический опрос всех пунктов, размещенных на данной линии связи, позволяет на ведущем ОП получить информацию (по запросу оператора) о состоянии датчиков на любом из контролируемых пунктов. Сбор информации осуществляется методом централизованного адресно-циклического опроса. Посылаемая с ведущего ОП команда опроса воспринимается лишь пунктом, адрес которого содержится в команде. Устройства телемеханики этого пункта формируют сообщения, содержащие код номера сигнализирующего датчика, информацию о его состоянии, а также информацию о наличии сообщений в памяти этого пункта, и передают эти сообщения в канал телемеханики.

Система служебной связи обеспечивает телефонную постанционную служебную связь (ПСС) между ОП и НРП и участковую служебную связь (УСС) между НРП и ОП или НРП и ОРП. Сигналы служебной связи передаются в цифровом виде. Аналого-цифровое преобразование осуществляется методом адаптивной дельта-модуляции со слоговым компандированием при скорости передачи 32 кбит/с, а затем преобразованный сигнал перекодируется в линейный сигнал в коде СМЖ.

Объединение цифровых сигналов служебной связи и сигналов телеконтроля, передаваемых со скоростью 0,2 кбит/с, производится методом асинхронного ввода парных ошибок (инверсия комбинаций 01 в коде СМЖ сигналов служебной связи).

Для связи с НРП предусмотрено переносное переговорное устройство с автономным питанием. Электропитание оборудования ОП и ОРП осуществляется от источников достоянного тока напряжением —24 В±2,4 или —60 В±6 с заземленным полюсом. Электропитание НРП может осуществляться или от автономного источника тока (например, термоэлектрического генератора) или дистанционно по медным жилам оптического кабеля диаметром

1,2 мм. По одной цепи дистанционного питания можно организовать питание аппаратуры одной или двух систем передачи одного НРП. При этом питание осуществляется по полусекциям с двух соседних питающих пунктов.

В табл. 6.3 приведены основные технические характеристики систем передачи внутризоновых сетей «Сопка-2» и «Сопка-3».

Таблица 6.3

Параметр	«Сопка-2»	Сопка-3»
Скорость передачи, Мбит/с	8,448	34,368
Число каналов ТЧ	120	480
Длина волны излучения, мкм	1,3	1,3
Энергетический потенциал, дБ	43	41
Коэффициент ошибок	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Тип линейного кода	5B6B	5B6B
Максимальная длина линейного тракта, км	600	600
Максимальное расстояние между обслуживаемыми пунктами, км	200	200
Максимальное напряжение ДП, В	700	700
Число волокон в кабеле	4(8)	4(8)
Строительная длина кабеля, м	2200	2200
Потери в срезках строительных длин, не более, дБ	0,3	0,3
Полоса пропускания кабеля, МГц·км	500 ... 800	500 ... 800

6.4. Технические характеристики ВОСП для магистральной сети

Для магистральной сети ЕАСС предусматривается система передачи «Сопка-4» на скорости 139,264 Мбит/с (четверичная цифровая система). Для таких скоростей передачи могут применяться только одномодовые оптические волокна, так как даже высококачественные градиентные многомодовые волокна с полосой пропускания 1,2...1,5 МГц ограничивают длину участка регенерации, внося недопустимые дисперсионные искажения. Система «Сопка-4» работает на волне длиной 1,3 мкм. Коэффициент затухания отечественного оптического кабеля в этом диапазоне длин волн составляет 0,7 дБ/км, а энергетический потенциал приемопередающей части аппаратуры не превышает 38 дБ. Поэтому длина участка регенерации системы «Сопка-4» не более 30 км. Обобщенная структурная схема системы передачи «Сопка-4» мало чем отличается от структурной схемы, приведенной на рис. 6.4. Аппаратура ОП и ОРП также содержит оборудование линейного тракта, служебной связи, телемеханики, устройств соединения стационарного и линейного кабелей и др.

Для четверичной системы передачи рекомендациями МККТТ принят стыковой код СМJ. В качестве линейного кода в оптическом линейном тракте системы «Сопка-4» используется код класса 10B1P1R, который позволяет совместно с информационным сигналом передавать по линейному тракту и выделять на промежуточных пунктах сигналы телемеханики, служебной связи и, кроме того, сигналы стандартной первичной группы со скоростью 2,048 Мбит/с. При этом скорость передачи линейного сигнала увеличивается в 1,2 раза и становится 167 Мбит/с.

Оптический кабель для «Сопки-4» имеет примерно такую же конструкцию, как и для «Сопки-2» и «Сопки-3», но с одномодовыми волокнами. Кабель выпускается двух типов: без металлических элементов и с металлическим внешним пояском.

Необслуживаемое промежуточное оборудование размещается в унифицированном грунтовой контейнере полуподземного типа и содержит блоки линейного регенератора, телемеханики, служебной связи, устройства ввода и соединения линейного и станционного кабелей, датчики состояния контейнера и контроля качественных показателей сигнала и др. Электропитание НРП осуществляется от автономных источников электропитания.

Основные технические характеристики системы передачи «Сопка-4»:

Скорость передачи, Мбит/с	139,264
Длина волны излучения, мкм	1,3
Энергетический потенциал, дБ	38
Коэффициент ошибок регенератора	10^{-10}
Тип линейного кода	10B1P1R
Максимальное расстояние между обслуживаемыми пунктами, км	830
Коэффициент затухания кабеля не более, дБ/км	0,7
Длина участка регенерации (при коэффициенте затухания кабеля 0,7 дБ/км), км	30
Строительная длина кабеля, м	2200
Число волокон в кабеле	4, 8, 16
Потери в срезках строительных длин, не более, дБ	3,5
Дисперсия кабеля, пс/нм·км	0,3

6.5. Системы передачи второго поколения

6.5.1. Общие сведения

Развитие волоконно-оптических систем передачи проводится в следующих направлениях. Первое из них связано с переходом в более длинноволновый диапазон, где коэффициент затухания оптического кабеля существенно меньше, чем у кабелей в диапазоне 1,3 мкм. В настоящее время осваивается промышленное производство электрооптических элементов и оптического кабеля, работающих в диапазоне длин волн 1,55 мкм. Практика применения этого диапазона показала, что энергетический потенциал приемопередающих устройств сохраняется примерно таким же, как в диапазоне 1,3 мкм, в то время как коэффициент затухания кабеля уменьшается до 0,25...0,3 дБ/км, что позволяет увеличить длину участка регенерации до 70...100 км. В более длинноволновом диапазоне (2,4...10,6 мкм), как показывают исследования, коэффициент затухания кабеля становится еще меньше (0,01...0,1 дБ/км), а длина участка регенерации возрастает до 300...500 км.

Второе направление развития связано с увеличением объема передаваемой информации по оптическому волокну за счет увеличения скорости передачи до нескольких гигабит в секунду и применения спектральных методов уплотнения.

Третье направление — применение более эффективных методов модуляции оптического излучения и когерентных методов приема сигнала, обладающих чувствительностью на 5...20 дБ выше, чем системы с прямым фотодетектированием.

Следует сказать, что второе и третье поколения ЦВОСП позволяют создавать новые сети связи с очень малым числом промежуточных станций.

6.5.2. ВОСП для городской сети ИКМ-480-5

Комплекс ВОСП «ИКМ-480-5» предназначен для применения на местных (городских) первичных сетях ЕАСС и представляет собой третичную ЦСП с линейным трактом на волоконно-оптическом кабеле с градиентными многомодовыми волокнами. Рассматривается вопрос о создании модификации для

работы по одномодовым волокнам. Кабель может содержать четыре (две системы передачи) или восемь (четыре системы передачи) волокон; разрабатывается кабель с 16 волокнами (до восьми систем передачи).

В состав комплекса ВОСП «ИКМ-480-5» входит типовая унифицированная аппаратура каналообразования и группообразования, разработанная в составе ИКМ-30-4 и ИКМ-120-4/5. В принципе ВОСП «ИКМ-480-5» может комплектоваться любым стандартным оборудованием канало- и группообразования. Рекомендуемый состав (номенклатура) типового оконечного оборудования: стоечный унифицированный каркас (СКУ); блоки АЦО-11 (от ИКМ-30-4); блоки оборудования вторичного временного группообразования ОВГ-21 (от ИКМ-120-4/5); блоки оборудования третичного временного группообразования ОТГ-31; блок унифицированного сервисного оборудования (УСО) (от ИКМ-30-4); блок для соединения линейных и станционных ОК.

Оборудование линейного тракта имеет блочную конструкцию и размещается на стоечном унифицированном каркасе. Промежуточные регенераторы размещаются в помещениях АТС.

На СКУ может быть установлено до 11 блоков в любом наборе; габариты СКУ составляют 2600×600×225 мм.

Электропитание аппаратуры осуществляется от станционной батареи номинальным напряжением 60 В.

Основные технические данные ВОСП «ИКМ-480-5»:

Система связи	Однокабельная
Канальная емкость (каналов ТЧ)	480
Длина волны оптической несущей, мкм	1,3
Максимальная длина линейного тракта, км	90
Максимальная длина участка регенерации, км	30
Тип излучателя	Лазерный диод
Вводимая оптическая мощность, дБм	—3
Энергетический потенциал, дБ	38
Коэффициент ошибок регенератора (максимальный)	1·10 ⁻⁹
Пределы АРУ, дБ	±13
Скорость передачи, кбит/с	34 368
Энергопотребление (максимальное), Вт:	
комплекта окончания линейного тракта	20
комплекта промежуточного оборудования линейного тракта	25
Среднее время наработки на отказ (планируемое), лет:	
комплекта окончания линейного тракта	20
комплекта промежуточного оборудования линейного тракта	10

6.5.3. ВОСП для внутризоновой сети «Сопка-3М»

Комплекс аппаратуры «Сопка-3М» представляет собой второе поколение аппаратуры третичной цифровой системы передачи по оптическому кабелю для внутризоновых сетей ЕАСС. Аппаратура работает в диапазоне оптических длин волн 1,55 мкм по кабелю с одномодовыми волокнами. В этом диапазоне принципиально возможна передача сигналов по световодному кабелю с меньшими потерями и дисперсионными искажениями, чем в ранее освоенном диапазоне длин волн 1,3 мкм, с передачей сигнала по кабелю с градиентными волокнами, принятом в ВОСП первого поколения для организации зонových линий связи. Затухание одномодового волоконно-оптического кабеля порядка 0,3 дБ/км в диапазоне 1,55 мкм позволяет построить световодные линии связи длиной участка до 70 км, что более чем в 2 раза превышает длину регенерационного участка, обеспечиваемого аппаратурой «Сопка-3». Соответственно резко сокращается число промежуточных регенерационных пунктов на линии связи, что обеспечивает существенные эксплуатационные и технико-экономические преимущества.

Комплекс «Сопка-3М» обеспечивает организацию цифровых линейных трактов со скоростью передачи 34,368 Мбит/с (480 каналов ТЧ).

Комплекс «Сопка-3М» предназначен для работы по одномодовым оптическим кабелям «Калибр-4М» с четырьмя волокнами и затуханием 0,3 дБ/км. Оптическая длина волны составляет 1,55 мкм.

Структурная схема линейного тракта аппаратуры «Сопка-3М» не отличается от структурной схемы аппаратуры «Сопка-3».

В состав линии передачи входят:
оконечные пункты, обеспечивающие передачу и прием линейного сигнала, служебной связи и телемеханики;

промежуточные обслуживаемые пункты, в которых может заканчиваться часть линейных трактов линии передачи. Они обеспечивают регенерацию линейного сигнала, передачу и прием сигналов телемеханики и служебной связи, выделение каналов. При необходимости они могут быть переведены в режим промежуточного полубслуживаемого пункта;

необслуживаемые регенерационные пункты, обеспечивающие регенерацию линейного сигнала, передачу и прием сигналов телемеханики и служебной связи.

Оборудование оконечных и обслуживаемых промежуточных пунктов предназначено для эксплуатации в отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха 5...40° С, относительной влажности воздуха до 80% при температуре 25° С и пониженном давлении до $5,9 \cdot 10^4$ Н/м².

Комплекс «Сопка-3М» обеспечивает организацию цифровых линейных —20...+40° С, относительной влажности воздуха до 98% при температуре 25° С и пониженном давлении $5,9 \cdot 10^4$ Н/м².

Основные характеристики системы передачи «Сопка-3М»:

Максимальная длина линейного тракта, км	600
Максимальное расстояние между промежуточными обслуживаемыми пунктами, км	200
Максимальное число НРП между двумя обслуживаемыми пунктами	2
Максимальная длина участка регенерации при затухании кабеля не более 0,3 дБ/км и потерях в неразъемных соединениях не более 0,1 дБ, не менее, км	70
Минимальная длина участка регенерации, км	40
Скорость передачи линейного сигнала, Мбит/с	68,736
Линейный код	1В2В
Среднее значение суммарного коэффициента ошибок на длине линейного тракта 600 км	$2 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент ошибок на один регенератор, не более	10^{-11}
Оптическая мощность, вводимая в одномодовое волокно, не менее, дБм	0
Минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе ФГУ, дБм	-38
Энергетический потенциал регенератора, не менее, дБ	38

Для организации регенерационных участков длиной менее 40 км следует использовать куски линейного и станционного кабеля или оптические аттенюаторы.

Ответвление цифровых потоков может производиться в промежуточных обслуживаемых пунктах, где устанавливаются стойки СОЛТ, с помощью оборудования канало- и группообразования.

Транзит оптического сигнала осуществляется на каждом промежуточном пункте, где устанавливаются стойки СОЛТ. В аппаратуре «Сопка-3М» выделение цифрового потока для спецпотребителя не предусмотрено.

В комплексе «Сопка-3М» предусмотрена организация сервисных подсистем телемеханики (одна система на два линейных тракта), служебной

связи, а также технологической служебной связи по медным жилам оптического кабеля. Цифровые сигналы ТМ и СС объединяются в общий цифровой поток и передаются в нижней части спектра информационного сигнала. Сигналы СС передаются в цифровом потоке информационного сигнала методом введения двойной ошибки и в оборудовании НРП не выделяются. Канал ТМ формируется в основном линейном тракте в низкочастотной части спектра и передается вместе с информационным сигналом по одним и тем же оптическим волокнам. Оборудование ТМ работает по распределительному принципу избирания с циклической синхронизацией и адресным принципом опроса.

Электропитание аппаратуры линейного тракта, размещаемой в обслуживаемых пунктах, предусмотрено от источников постоянного тока напряжением —24 или —60 В с заземленным положительным полюсом.

Способ питания оборудования промежуточных пунктов должен выбираться в зависимости от места установки этого оборудования (в контейнере или помещении, имеющем бесперебойное электропитание).

Возможно три способа питания оборудования НРП:

при территориальном совпадении НРП с предприятиями связи, имеющими установки бесперебойного питания, от ЭПУ указанных предприятий связи;

дистанционно с ближайшего ОП или промежуточного пункта по металлическим жилам оптического кабеля;

от автономного источника питания на базе термоэлектрогенераторов (ТЭГ).

Длина секции ДП составляет 210 км, ток в цепи ДП 200 мА при максимальном напряжении 850 В. Термоэлектрогенераторы типа «Ирис» имеют следующие характеристики:

Выходное напряжение, В	10,5
Выходной ток, А	2,2
Выходная мощность, Вт	23
Напряжение на входе контейнера НРП при токе нагрузки 2,2 А, не менее, В	10,35
Время работы без обслуживания, ч	4380
Марка топлива	Реактивное Т-1
Расход топлива, кг/ч	0,1
Размещение ТЭГ	Наземное в контейнерах
Температура окружающей среды	—60...+50° С

Для подключения ТЭГ к контейнеру НРП, содержащему две системы передачи, должен использоваться кабель МКБАБл — 7×4×1,2+5×2×0,9 длиной не более 8 м. Четверки с жилами диаметром 1,2 мм используются для электропитания оборудования НРП, а сигнальные жилы диаметром 0,9 мм — для подачи сигналов от датчиков.

Аппаратура «Сопка-3М» состоит из стоечного и контейнерного оборудования. К стоечному оборудованию относится оконечное оборудование, оборудование телемеханики и служебной связи, оборудование дистанционного питания. Это оборудование располагается на стойках размером 2600×120×240 мм. Контейнерное оборудование размещается в унифицированном контейнере группового типа, обеспечивающем возможность размещения НРП для двух систем передачи.

6.5.4. ВОСП для магистральных линий связи «Сопка-4М» и «Сопка-5»

Комплекс «Сопка-4М». Комплекс «Сопка-4М» представляет собой волоконно-оптическую систему передачи второго поколения. По сравнению с ВОСП «Сопка-4» комплекс «Сопка-4М» обеспечивает существенно большую

длину регенерационного участка, что позволяет реализовать высокие показатели качества работы системы и ее надежность за счет сокращения числа промежуточных пунктов.

Комплекс «Сопка-4М» работает в диапазоне волн 1,55 мкм по оптическому кабелю типа «Калибр-4М» с одномодовыми волокнами (4 или 8).

Структурная схема аппаратуры «Сопка-4М» не отличается от структурной схемы комплекса «Сопка-4». В состав комплекса «Сопка-4М» входят: оптический линейный тракт, аппаратура временного группообразования и каналообразующая аппаратура.

Оптический линейный тракт состоит из стационарного оборудования оконечных пунктов, оборудования промежуточных обслуживаемых и необслуживаемых пунктов.

Стационарное оборудование оконечных пунктов содержит стойки окончания линейного тракта; стойки телемеханики и служебной связи; аппаратуру отображения и документирования служебной информации; стационарные кабели; контрольно-измерительную аппаратуру; комплекс специализированного инструмента для монтажа одномодового кабеля в полевых условиях.

Оборудование НРП содержит: блоки линейных регенераторов; блоки телемеханики и служебной связи; блоки выделения резервного канала для спецпотребителя; блоки вторичного электропитания; вводно-кабельное оптическое устройство; контейнер группового типа для размещения оборудования НРП для двух систем передачи или цистерну, если число организуемых систем более двух.

Основные технические характеристики системы:

Скорость передачи четверичного цифрового сигнала на входе (выходе) линейного тракта, Мбит/с	139,264
Число каналов ТЧ	1920
Предельная длина однородного линейного тракта, км	830
Максимальное число НРП на участке между двумя соседними ОП	12
Коэффициент ошибок при предельной длине линейного тракта	10^{-9}
Рабочая оптическая длина волны, мкм	1,55
Ширина оптического спектра излучения, не более, нм	0,3
Энергетический потенциал регенератора, не менее, дБ	38
Максимальная длина регенерационного участка, км	70

Система передачи имеет оборудование ТМ, обеспечивающее контроль за состоянием линейного тракта предельной длины 830 км. В каждом линейном тракте организуется независимая участковая и постанционная служебная связь.

Минимальное значение средней мощности оптического сигнала на входе фотоприемного устройства регенератора, обеспечивающего коэффициент ошибки на выходе решающего устройства регенератора 10^{-10} , не менее 38 дБ.

Электропитание оконечного оборудования (ОП и ОРП) осуществляется от электропитающих установок постоянного тока напряжением —24 или —60 В с заземленным положительным полюсом.

Электропитание аппаратуры НРП осуществляется одним из перечисленных ниже способов:

при территориальном совпадении НРП с предприятиями связи, имеющими бесперебойные источники питания, — от ЭПУ этих предприятий;

от автономных источников питания;

при наличии в волоконно-оптическом кабеле металлических жил — дистанционно с обслуживаемых пунктов.

При установке оборудования двух и более систем передачи предусматриваются два независимых ввода питания систем и ввод питания системы

сигнализации. Оборудование каждой системы получает питание от собственных источников вторичного электропитания.

Мощность, потребляемая в НРП оборудованием двух систем передачи, составляет не более 45 Вт.

Техническое обслуживание аппаратуры «Сопка-4М» заключается в оперативном контроле за техническим состоянием станционных и линейно-кабельных сооружений, проведении планово-профилактических и организации ремонтно-восстановительных работ.

Комплекс ВОСП «Сопка-5». Комплекс «Сопка-5» предназначен для организации по одному оптическому кабелю с одномодовыми волокнами мощных пучков каналов и цифровых трактов на магистральных линиях передачи, соединяющих сетевые узлы. Кабель содержит четыре (две системы передачи) или восемь (до четырех систем передачи) оптических волокон. Передача должна осуществляться в третьем окне прозрачности, соответствующем номинальной длине волны 1,55 мкм.

У Общее эквивалентное число каналов ТЧ, организуемое в одной ВОСП «Сопка-5» по паре волокон, составляет 7680. Кроме того, в линейном тракте ВОСП «Сопка-5» может быть организовано до 16 дополнительных первичных цифровых трактов с пропускной способностью 2048 кбит/с каждый, оканчивающихся соответствующими стандартными стыками. Указанные дополнительные тракты могут выделяться на промежуточных регенерационных пунктах (в том числе и не обслуживаемых). Таким образом, предельная эквивалентная канальная емкость ВОСП «Сопка-5» может достигать $7680 + 480 = 8160$ каналов.

Длина регенерационного участка ВОСП «Сопка-5» при работе по волокну с затуханием не более 0,3 дБ/км в диапазоне 1,55 мкм достигает 70 км.

Комплекс аппаратуры и оборудования ВОСП «Сопка-5» размещается на следующих пунктах: оконечных, обслуживаемых регенерационных, полубслуживаемых регенерационных и необслуживаемых регенерационных. Часть указанных пунктов может быть пунктами транзита и выделения цифровых сигналов. На каждые 14 промежуточных пунктов линии передачи должно быть не более десяти необслуживаемых пунктов.

Аппаратура ОП, ОРП, ПОРП имеет стоечную конструкцию типа «вертикаль» с габаритными размерами $2600 \times 120 \times 225$.

Аппаратура НРП может размещаться в неотопляемых помещениях (цистерна, бункер) и конструктивно представляет собой герметизированные или пылевлагозащитные блоки, установленные в металлоконструкцию (раму).

Аппаратура «Сопка-5» содержит стандартный комплекс унифицированного канала- и группообразующего оборудования, обеспечивающего формирование четвертичных цифровых сигналов со скоростью передачи 139 264 кбит/с.

Прохождение четвертичных цифровых сигналов по линейному тракту «Сопка-5» осуществляется следующим образом. Четвертичные цифровые сигналы поступают на устройства четвертичных стыков аппаратуры окончания линейного тракта (ОЛТ), затем путем кодирования в сигнал типа 10В1Р1R осуществляется асинхронный ввод информационного четвертичного сигнала, а также асинхронный ввод четырех дополнительных первичных сигналов и объединение их с рядом служебных и вспомогательных сигналов, в результате чего формируется компонентный блок линейного сигнала с тактовой частотой 167 116 800 Гц. Далее четыре компонентных блока линейного сигнала синхронно объединяются в агрегатный электрический цифровой линейный сигнал с тактовой частотой 668 467 200 Гц. Следует отметить, что на базе компонентного блока могут быть построены более мощные системы передачи типа ИКМ-1920Хл, где л больше четырех (например, 8 или 16). Наконец, электрический цифровой линейный сигнал преобразуется в оптическую форму и в диапазоне волн 1,55 мкм вводится в одномодовое волокно. Промежуточная регенерация сигнала производится в электрической форме. На приемном конце линейного тракта операции осуществляются в

обратном порядке. В каждом компонентном блоке линейного сигнала имеется возможность организации каналов служебной связи и телемеханики. Комплекс ВОСП «Сопки-5» ориентирован на автоматизацию обслуживания.

Основные данные комплекса «Сопка-5»:

Эквивалентное число каналов ТЧ (ОЦК)	. . . . .	7680
Эквивалентная скорость передачи основных информационных сигналов, Мбит/с	. . . . .	$139,264 \times 4$
Скорость передачи линейного цифрового сигнала, Мбит/с	. . . . .	668,4672
Линейный код	. . . . .	10B1P1R
Номинальная длина волны оптического передатчика, мкм	. . . . .	1,55
Ширина полосы оптического излучения передатчика, нм	. . . . .	0,3
Максимальное затухание оптического сигнала на участке регенерации, дБ	. . . . .	25
Пределы АРУ, дБ	. . . . .	15
Максимальная длина участка регенерации, км	. . . . .	70
Максимальная длина однородного линейного тракта, км	. . . . .	830
Максимальная длина секции ДП (при дистанционном питании НРП), км	. . . . .	210
Коэффициент ошибок на выходе линейного тракта максимальной протяженности (на четверичном стыке)	. . . . .	$1 \cdot 10^{-9}$
Номинальное напряжение электропитания стационарной аппаратуры, В	. . . . .	24 или 60
Мощность энергопотребления НРП на одну систему передачи, Вт	. . . . .	50
Планируемое среднее время наработки на отказ, лет: линейного тракта (на дуплексный линейный тракт)	. . . . .	10
комплект промежуточного оборудования линейного тракта	. . . . .	20

Глава 7

Аппаратура волоконно-оптических систем передачи

7.1. Принципы построения аппаратуры ВОСП

В цифровых системах передачи основным принципом формирования канальных сигналов является дискретизация первичных аналоговых сигналов по времени с частотой f_d и по уровню (квантования) с шагом Δ , в результате чего аналоговые сигналы преобразуются в последовательность импульсов с частотой следования $f_d = 1/T_d$, амплитуды которых могут принимать только разрешенные при квантовании значения, равные $k\Delta$. Чем больше число уровней в заданном динамическом диапазоне сигналов (т. е. чем меньше шаг квантования Δ), тем точнее можно передать мгновенное значение исходного сигнала, а следовательно, тем меньше будет искажений, которые воспринимаются как специфическая помеха, называемая шумом квантования. Если принять распределение амплитуд импульсов шума квантования равномерным, то мощность шума квантования можно определить по формуле $P_{ш.кв} = \Delta^2/12$, из которой видно, что для уменьшения мощности шума квантования необходимо уменьшить шаг квантования Δ . С другой стороны, чем больше шаг квантования, тем выше допустимый уровень помех в канале, не приводящих к ошибкам на приемном конце. Максимальная помехоустойчивость может быть достигнута в импульсной последовательности с двумя разрешенными уровнями. Поэтому при формировании линейного сигнала многоуровневый квантовый сигнал преобразуется в двухуровневый так, что каждому из разрешенных значений квантованных импульсов соответствует кодовая комбинация из m двоичных символов.

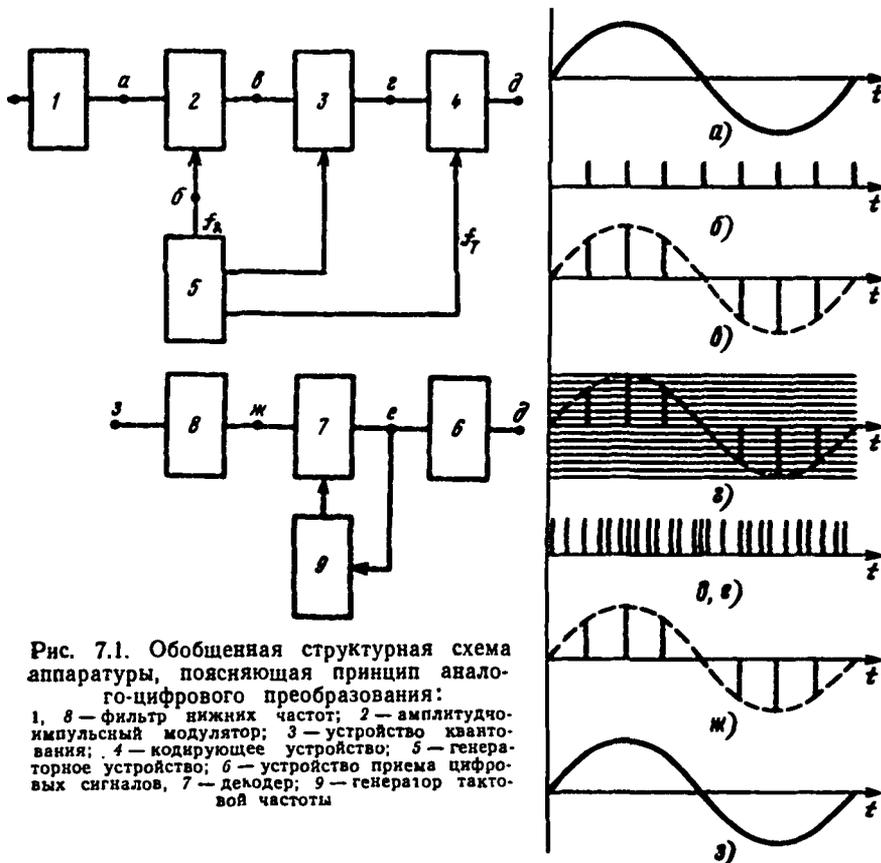


Рис. 7.1. Обобщенная структурная схема аппаратуры, поясняющая принцип аналого-цифрового преобразования:
 1, 8 — фильтр нижних частот; 2 — амплитудно-импульсный модулятор; 3 — устройство квантования; 4 — кодирующее устройство; 5 — генераторное устройство; 6 — устройство приема цифровых сигналов; 7 — декодер; 9 — генератор тактовой частоты

Рис. 7.2. Форма сигналов в узлах аппаратуры аналого-цифрового преобразования:

а — исходный аналоговый сигнал после ФНЧ; б — импульсы с частотой дискретизации; в — амплитудно-модулированные импульсы; г — квантованная последовательность; д, е — цифровая последовательность; ж — амплитудно-модулированные импульсы на выходе декодера; з — демодулированный сигнал на выходе ФНЧ

Максимальное число уровней M , которое может быть закодировано m -разрядным двоичным кодом, будет равно $M = 2^m$. Рекомендациями МККТТ число разрядов для канала ТЧ принято равным восьми. Частота следования АИМ-импульсов (точка в на рис. 7.1) равна f_k .

На приемном конце происходит обратное преобразование — декодирование, в процессе которого формируется последовательность АИМ-импульсов, амплитуды которых соответствуют поступающим кодовым комбинациям, а затем демодуляция АИМ-сигнала при помощи фильтра нижних частот.

На рис. 7.1 представлена обобщенная структурная схема аппаратуры, поясняющая принцип преобразования аналогового сигнала в цифровой, а на рис. 7.2 — форма сигнала в соответствующих точках схемы рис. 7.1.

Большое значение имеет выбор частоты дискретизации по времени f_k . Она выбирается так, чтобы энергетические спектры составляющих после АИМ-преобразования оказались не перекрываемыми. Безыскаженное восстановление (фильтрация) исходного сигнала обеспечивается выбором частоты

дискретизации по времени f_d , которая на основании теоремы Котельникова должна быть $f_d \geq 2F_a$, где F_a — верхняя частота спектра сигнала, ограниченная фильтром НЧ на передаче (точка *a* на рис. 7.1).

Для канала ТЧ с верхней частотой 3,4 кГц в современных системах с ИКМ принято $f_d = 8$ кГц или период дискретизации $T_d = 125$ мкс.

Среди многоканальных цифровых систем передачи наибольшее распространение получили системы с разделением каналов по времени. На рис. 7.3 приведена обобщенная структурная схема приемопередающей части аппаратуры ИКМ. На передаче после ограничения спектра фильтром НЧ и дискретизации по времени ключевым канальным дискретизатором отсчеты канальных сигналов, сдвинутые во времени друг относительно друга на интервал $t_k = T_d/N$ (N — число каналов), объединяются в групповой АИМ-сигнал. В процессе объединения устанавливается определенная последовательность расположения во времени передаваемых канальных сигналов; при этом вводятся специальные метки (дополнительные сигналы) начала и конца этой последовательности, чтобы на приемном конце обеспечить правильное разделение сигналов по каналам. Кроме того, в общий поток вводится еще ряд дополнительных и вспомогательных сигналов, необходимых для передачи низкоскоростных сообщений (телеграфных, команд управления и контроля), а также для организации каналов служебной связи. В унифицированной ап-

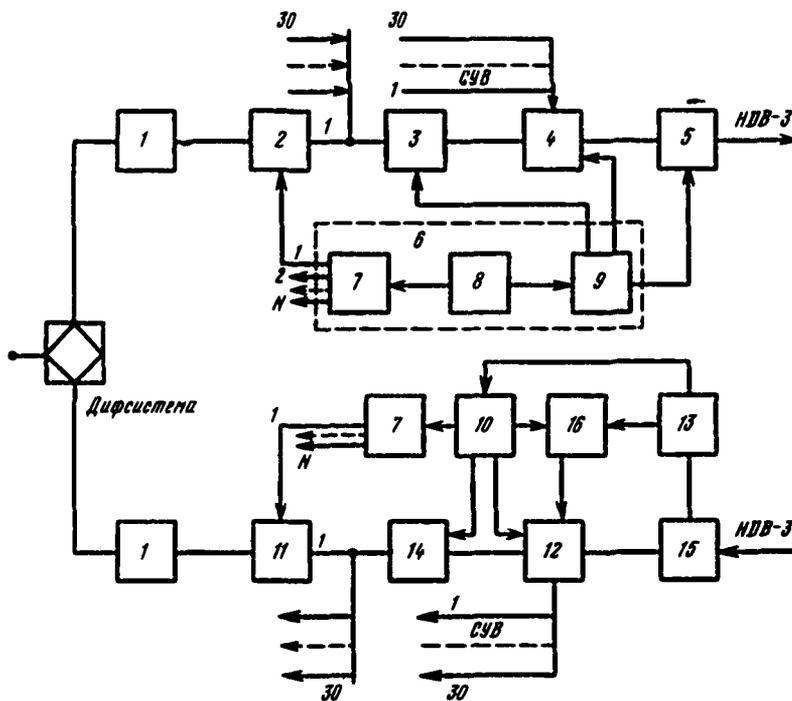


Рис. 7.3. Обобщенная структурная схема приемопередающей части аппаратуры ИКМ:

1 — фильтр низкой частоты, 2 — канальный дискретизатор, 3 — кодирующее устройство; 4 — устройство объединения; 5 — устройство формирования; 6 — общее генераторное оборудование; 7 — распределитель канальных импульсов, 8 — задающий генератор; 9 — формируватель хронизирующих импульсов, 10 — генераторное оборудование приема; 11 — канальные селекторы, 12 — устройство разделения, 13 — выделитель тактовой частоты; 14 — декодер, 15 — преобразователь кода, 16 — формирователь синхросигналов

паратуре ИКМ-30 для этих целей выделяются два дополнительных канала к 30 каналам ТЧ, так что общее число канальных интервалов в цикле равно 32, а частота следования АИМ-импульсов объединенной последовательности $f_{\text{АИМ}} = f_0(N+D) = 8(30+2) = 256$ кГц, где D — число дополнительных каналов

В последующих узлах групповой передающей части аппаратуры производится квантование сигнала по уровню и кодирование восьмиразрядным двоичным кодом. Поэтому после кодирования частота следования импульсов (тактовая частота) $f_t = f_0(N+D)m = 8(30+2) \cdot 8 = 2048$ кГц

Для ввода сигналов управления и взаимодействия в общий цифровой поток в групповой части аппаратуры предусмотрено устройство объединения. Объединенная последовательность импульсов в формате NRZ затем преобразуется устройством формирования в стыковой стандартный код HDB-3. Так образуется стандартная первичная группа цифровых систем передачи со скоростью 2,048 Мбит/с

Для обеспечения высокой стабильности тактовой частоты и синхронной работы всех устройств в передающей части аппаратуры предусмотрено общее генераторное оборудование, содержащее кварцевый задающий генератор, распределитель канальных импульсов и формирователь хронизирующих импульсов. В приемной части аппаратуры также имеется генераторное оборудование, которое управляет работой канальных селекторов, устройством выделения сигналов управления и взаимодействия (СУВ) из общего цифрового потока, формирователем синхросигналов и другими устройствами

Для обеспечения синхронной работы приемной и передающей аппаратуры генератор приемной части синхронизируется сигналами, которые формируются выделителем тактовой частоты из общей цифровой последовательности

После выделения сигналов СУВ в устройстве разделения и декодирования в декодере импульсы, модулированные по амплитуде, распределяются канальными селекторами по соответствующим номерам каналов и детектируются фильтром НЧ

На рис 74 приведена структура первичного группового сигнала аппаратуры ИКМ-30, нормированная рекомендациями G 732 МККТТ. Она состоит из последовательности следующих друг за другом сверхциклов, каждый из которых содержит 16 циклов. Каждый цикл (Ц) состоит из 32 восьмиразрядных канальных интервалов (КИ). Отсчет циклов в сверхцикле (СЦ) начинается с нулевого, содержащего символы 0000 (сигнал сверхцикловой синхронизации)

Как отмечалось ранее, тридцать канальных интервалов всех циклов (с первого по пятнадцатый и с семнадцатого по тридцать первый) исполь-

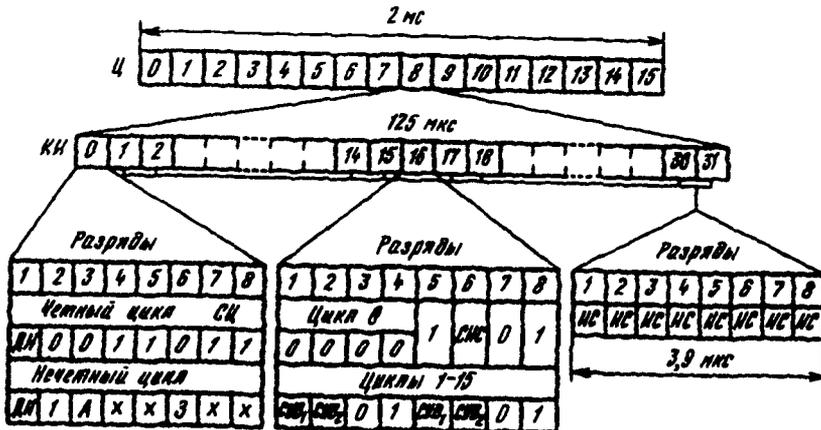


Рис 74 Структура группового сигнала аппаратуры ИКМ-30

зуются для передачи информационных символов (ИС) двоичного восьмиразрядного кода. Нулевой и шестнадцатый каналные интервалы всех циклов используются для передачи вспомогательных и дополнительных сигналов. Так, для передачи дискретной информации (ДИ) выделен первый разряд всех нулевых каналных интервалов. Остальные разряды этого интервала четных циклов используются для передачи сигналов цикловой синхронизации кодом 0011011, а в нечетных циклах для контроля остаточного затухания (З) (шестой разряд) и для передачи нарушений цикловой синхронизации на приеме (А) (третий разряд). В шестнадцатом каналном интервале циклов с первого по пятнадцатый передаются по два сигнала управления и взаимодействия. Кроме того, шестой разряд шестнадцатого интервала нулевого цикла используется для передачи сигналов о нарушении сверхциклового синхронизма (СЦС) на приеме. Таким образом, за каждый цикл (125 мкс) передается информация об одном отсчете каждого из 30 каналов, а за время одного сверхцикла (2 мс) передаются все предусмотренные в системе вспомогательные сигналы.

Указанный способ формирования многоканального цифрового потока используется в отечественной аппаратуре первичных систем передачи ИКМ-30, которая широко применяется на соединительных линиях ГТС.

В аппаратуре ЦСП более высоких ступеней иерархии увеличение числа каналов (и соответственно скорости передачи) достигается путем объединения нескольких 30-канальных групп в единый цифровой поток.

Так, в аппаратуре ЦСП второй ступени иерархии объединяются четыре первичных потока по 2,048 Мбит/с, образуя 120 каналов ТЧ с общей скоростью передачи 8,448 Мбит/с. В следующей, третичной ступени иерархии объединяются четыре вторичных потока, образуя 480 каналов ТЧ (скорость передачи 34,368 Мбит/с), а в четверичной ступени объединяются четыре третичных потока, образуя общий цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с (1920 каналов ТЧ).

На рис. 7.5 представлена обобщенная структурная схема аппаратуры вторичного временного группообразования. Четыре первичных групповых 30-канальных потока поступают на входы преобразователей кода, где стыковой код HDB-3 преобразуется в последовательность в формате NRZ с частотой следования 2048 кГц и передается в блоки асинхронного сопряжения. Одновременно на эти блоки от генераторного оборудования поступают управляющие сигналы с частотами 2048 и 2112 кГц. В процессе асинхронного сопряжения все четыре объединяемых потока синхронизируются путем записи входных сигналов с частотой 2048 кГц и последующего считывания с частотой 2112 кГц. В блоках асинхронного сопряжения происходят обнаружение и коррекция временных сдвигов, возникающих между импульсами записываемых и считываемых потоков, а также формирование и передача команд согласования скоростей.

Четыре синхронизированных потока вместе с командами согласования скоростей передаются в блок формирования группового сигнала. Одновременно туда поступают и объединяются в общий поток сигналы цикловой синхронизации, дискретной информации и служебной связи. Как уже указывалось, стыковым кодом для вторичной системы передачи также является код HDB-3. Поэтому в аппаратуре ВВГ предусмотрен преобразователь сигналов в формате NRZ в стыковой код HDB-3.

В приемной части аппаратуры ВВГ происходит разделение общего группового потока на четыре первичных. Генераторное оборудование синхронизируется сигналами тактовой частоты вторичной группы, выделенными из поступающего линейного сигнала, что обеспечивает синхронную работу передающих и приемных узлов аппаратуры. В приемнике сигналов цикловой синхронизации из общего потока выделяются сигналы цикловой синхронизации, необходимые при разделении потоков. Преобразователи кодов на входе и выходе выполняют те же функции, что и в передающей аппаратуре.

Описанный принцип работы аппаратуры ВВГ используется и в аппаратуре третичного (ТВГ) и четверичного (ЧВГ) группообразования, с той разницей, что в ЧВГ в качестве стыкового кода принят код СМ1.

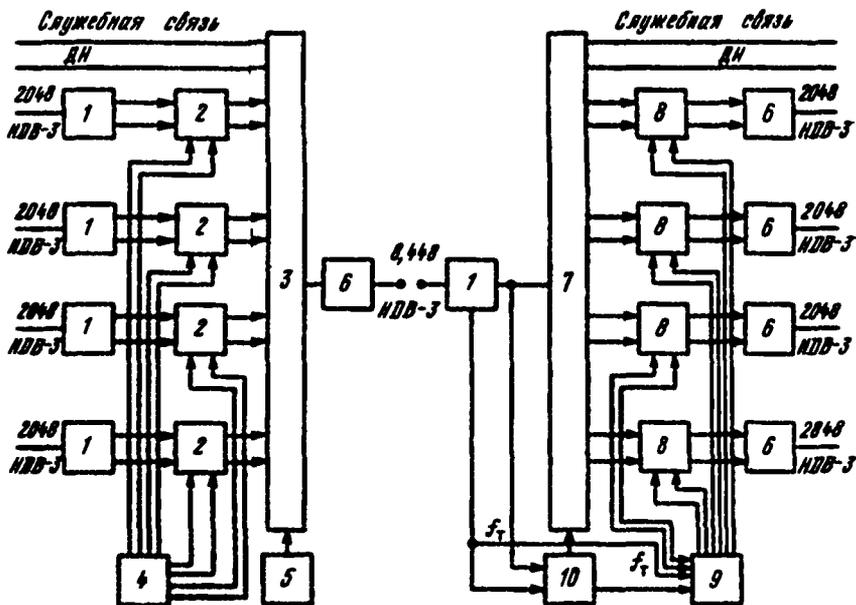


Рис. 7.5. Обобщенная структурная схема аппаратуры ВВГ:

1 — преобразователи кода в направлении приема; 2 — блок асинхронного сопряжения на передаче; 3 — формирователь группового сигнала; 4 — генераторное оборудование на передаче; 5 — передатчик синхросигнала; 6 — преобразователь кода в направлении передачи; 7 — разделитель группового сигнала; 8 — блок асинхронного сопряжения на приеме; 9 — генераторное оборудование в приемной части аппаратуры; 10 — приемник синхросигнала

Для передачи по линиям связи (симметричным, коаксиальным и оптическим кабелям, радиорелейным и спутниковым линиям) цифровых потоков в ЦСП предусмотрена аппаратура линейного тракта, содержащая оконечное и промежуточное оборудование. Оконечная аппаратура содержит устройства согласования передаваемых сигналов с параметрами и характеристиками линии передачи, включая устройства преобразования кодов и исходных спектров в линейный диапазон частот (оптический, радио и др.), а также вспомогательную контрольно-измерительную и сервисную аппаратуру, необходимую для контроля состояния станционной и линейной аппаратуры и технического обслуживания линии в процессе эксплуатации.

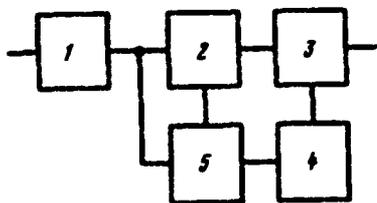


Рис. 7.6. Структурная схема регенератора:

1 — усилитель-корректор; 2 — решающее устройство; 3 — формирующее устройство; 4 — устройство синхронизации; 5 — выделитель тактовой частоты

В линии и в аппаратуре линейные сигналы искажаются: изменяется их форма, длительность, интервалы между импульсами, уменьшается амплитуда, в результате чего увеличивается вероятность ошибочного приема. Для восстановления параметров сигнала на промежуточных станциях и в приемной части аппа-

ратуры линейного тракта устанавливают регенераторы. Структурная схема регенератора приведена на рис. 7.6. Входной сигнал корректируется, усиливается и поступает на решающее устройство, в котором принимается решение о приеме нуля или единицы. Если отсчет входного сигнала по уровню выше установленного для данной системы порога, то принимается решение о наличии единицы, а если ниже порога, отсчет принимается за нуль. В формирующем устройстве устанавливаются параметры и форма линейного сигнала (амплитуда, длительность импульсов, длительность интервалов, линейный код и др.). Устройство синхронизации вырабатывает управляющие сигналы для последовательной работы указанных узлов. Тактовая частота выделяется из принимаемого линейного сигнала.

7.2. Аппаратура ВОСП для соединительных линий ГТС

7.2.1. Аппаратура «Соната-2»

Аппаратура волоконно-оптической системы передачи «Соната-2» предназначена для использования на городских сетях связи при организации межузловых соединительных линий и содержит в общем случае следующее оборудование:

- стойки аналого-цифрового оборудования (АЦО);
- стойки вторичного временного группообразования (ВВГ);
- оконечную (СОЛСТ-О-2) и промежуточную (СОЛСТ-П-2) стойки оборудования линейного световодного тракта.

Стойка аналого-цифрового оборудования в полном заполнении формирует четыре цифровых потока со скоростью передачи 2,048 Мбит/с. В стойке вторичного временного группообразования формируются цифровые потоки, соответствующие 120 каналам ТЧ (скорость передачи 8,448 Мбит/с). Эти сигналы в стыковочном коде HDB-3 поступают на СОЛСТ-О-2, которая обеспечивает:

- формирование, передачу и прием линейного сигнала;
- организацию контроля линейного оборудования стойки;
- организацию контроля линейного тракта;
- организацию служебной связи.

Промежуточная стойка оборудования линейного световодного тракта осуществляет трансляцию линейного оптического сигнала, контроль линейного оборудования стойки и служебную связь. Структурная схема представлена на рис. 7.7.

Конструкция стоек СОЛСТ-О-2 и СОЛСТ-П-2 идентична. Каркас стойки оборудования линейного световодного тракта оконечной станции предназначен для размещения:

- восьми кассет оконечного оборудования линейного световодного тракта (КОЛСТ-О);

- двух кассет оконечного оборудования обслуживания стойки (КООС-О).

Каркас стойки оборудования линейного световодного тракта промежуточной станции предназначен для размещения следующих комплектов восьми кассет промежуточного оборудования линейного световодного тракта (КОЛСТ-П) и двух кассет промежуточного оборудования обслуживания стойки (КООС-П).

Каркасы стоек состоят из нижней и верхней рам, соединенных боковыми стенками. На верхней раме размещены лампы стоечной сигнализации, клеммы для подключения внешних источников питания и «земля», гребенки. Справа и слева в стойке расположены шахты, в которых прокладываются электрические, оптические кабели и земляные шины. В правой шахте размещают жгуты для соединений кассет стойки между собой, а в левой — стационарные оптические кабели и электрические кабели стыка с аппаратурой ВВГ. Кабели крепят нитками и угольниками, установленными на боковых стенках. Сзади стойки закрыты обшивками.

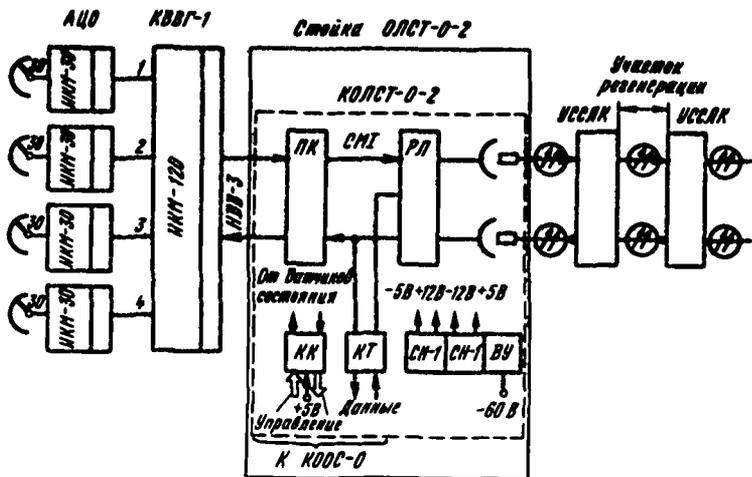


Рис. 7.7. Структурная схема

Габариты СОЛСТ-О-2 и СОЛСТ-П-2 составляют 225×600×2600 мм. Конструкция стоек позволяет использовать для их установки стандартные крепежные изделия от оборудования ИКМ. Ориентировочная масса стоек при их полном заполнении не более 240 кг.

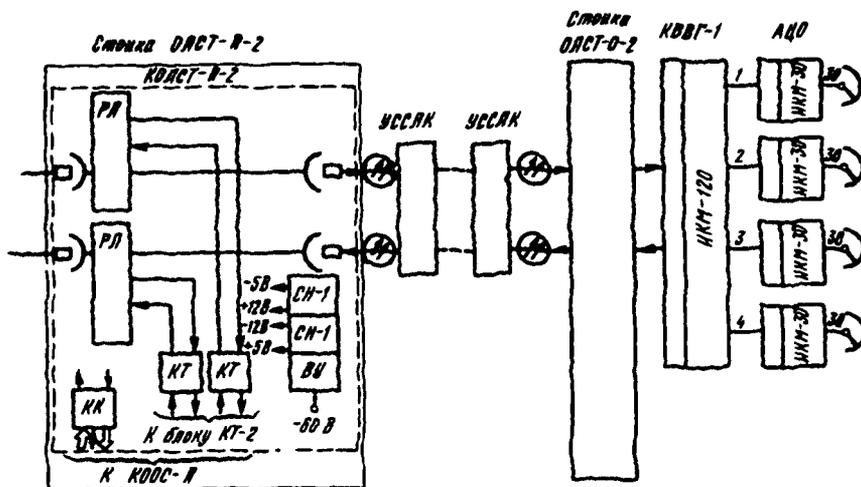
В комплект поставки стойки СОЛСТ-О-2 входят одна кассета КОЛСТ-О-2 и одна кассета КООС-О. Дополнительные семь кассет КОЛСТ-О-2 и одну кассету КООС-О заказывают и поставляют отдельно. В комплект кассеты КООС-О входит устройство стыка стационарного и линейного оптических кабелей (УССЛК), которое рассчитано на включение от одной до четырех систем линейного оборудования. В комплект каждой из кассет КОЛСТ-О-2 входит два отрезка стационарного оптического кабеля длиной 30 м с разъёмным оптическим соединителем на одном конце.

В комплект поставки стойки СОЛСТ-П-2 входят одна кассета КОЛСТ-П-2 и одна кассета КООС-П. Дополнительные семь кассет КОЛСТ-П-2 и одну кассету КООС-П заказывают и поставляют отдельно. В комплект кассеты КООС-П входят два комплекта УССЛК. В комплект каждой из кассет КОЛСТ-П-2 входят четыре отрезка одноволоконного стационарного оптического кабеля длиной 30 м с разъёмным оптическим соединителем на одном конце, входящие в комплект монтажных частей КОЛСТ-П.

Оборудование линейного световодного тракта оконечных и промежуточных станций рассчитано на эксплуатацию при температуре окружающего воздуха 5...40°С и относительной влажности воздуха до 95% при температуре до 30°С.

Устройство стыка стационарного и линейного оптических кабелей конструктивно выполнено в виде металлической коробки (габаритные размеры 280×220×120 мм), состоящей из кожуха и съёмной крышки с замками. Сращивание оптических волокон линейного и стационарного кабелей осуществляется методом сварки. В кожухе размещены платы для намотки излишков оптических волокон после сварки, патрубки для ввода и фиксации линейного и стационарного кабелей, а также два крепежных отверстия для закрепления устройства на скобе, которая входит в комплект монтажных частей стойки СОЛСТ.

Патрубки состоят из резиновой втулки с двумя шайбами и гайки и рассчитаны на диаметр стационарного кабеля с одним оптическим волокном.



комплекса «Соната-2»

Устройство УССЛК содержит один патрубков для линейного кабеля и восемь патрубков для станционного кабеля, а также восемь плат для намотки излишков оптических волокон.

Возможна установка УССЛК на металлоконструкциях ЛАЦа. Расстояние от места крепления УССЛК до СОЛСТ-О и СОЛСТ-П не более 25 м.

Как оконечные, так и промежуточные стойки устанавливаются в зданиях АТС.

Оборудование оптического линейного тракта питается от источника постоянного тока напряжением -60 В. При отклонении напряжения питания от номинала на $\pm 10\%$ все параметры оборудования остаются в пределах нормы (ГОСТ 5237—83).

На стойку СОЛСТ (верхняя рама) подводится три фидера питания (два рабочих и один сигнальный). Каждый рабочий фидер обеспечивает питание половину оборудования, расположенного на стойке. Ток потребления по цепи -60 В для КОЛСТ-О-2, КОЛСТ-П-2, КООС-О и КООС-П составляет соответственно 0,35; 0,45; 0,4 А и 0,4 А.

Фильтры питания и предохранители установлены в верхней части стоек.

Принцип работы КОЛСТ-О-2 следующий. Входной информационный сигнал в стыковочном коде НДВ-3 поступает на блок преобразователя кода (ПК), где происходит преобразование информационного сигнала в код НДВ-3 со скоростью передачи 8,448 Мбит/с в линейный сигнал в коде СМ1.

Далее сигнал в коде СМ1 поступает в блок линейного регенератора (РЛ), где электрическая последовательность импульсов преобразуется в последовательность оптических импульсов, которая через входной оптический соединитель поступает в оптический кабель.

Принимаемая последовательность оптических импульсов из оптического кабеля через оптический соединитель поступает на лавинный фотодиод, где происходит преобразование оптических импульсов в последовательность электрических импульсов. Последние после усиления, коррекции и регенерации в блоке РЛ поступают в блок ПК. После обратного преобразования линейного сигнала из кода СМ1 в стыковочный код НДВ-3 информационный сигнал поступает в смежный комплект ВВГ.

Блоки стабилизаторов напряжения СН-1 обеспечивают кассеты КОЛСТ-О-2 питающим напряжением.

Через вводное устройство (ВУ) осуществляется подключение к cassette фидера питания от стационарной батареи —60 В. Все блоки унифицированы и могут применяться как в КОЛСТ-О-2, так и в КОЛСТ-П-2.

В cassette КОЛСТ-П-2 содержится два блока РЛ, что обеспечивает двустороннюю регенеративную трансляцию оптических сигналов, т. е. производится восстановление формы, мощности и временных соотношений в последовательностях оптических импульсов по направлениям А и Б.

Система технического обслуживания (СТО) ЦВОСП «Соната-2» предназначена для контроля оборудования оконечных и промежуточных станций линейных световодных трактов. Контроль оборудования на каждой стойке осуществляется непрерывно. Передача информации о состоянии оборудования каждой станции и линейного тракта в целом, а также отображение этой информации на оконечных стойках осуществляются по рабочей паре оптических волокон (с перерывом связи) автоматически при возникновении аварийной ситуации на любой из станций (оконечных или промежуточных) и вручную оператором при регламентных работах с любой из оконечных станций. Отображение состояния оборудования линейного тракта (номер линейного тракта, номер станции, направление передачи и вид неисправности) осуществляется на каждой оконечной стойке одновременно. Общее число контролируемых станций в каждом линейном тракте — 11 (девять промежуточных и две оконечные), а контролируемых трактов с одной СОЛСТ — восемь. Контроль состояния оборудования линейного световодного тракта при полном заполнении стоек (восемь систем) обеспечивается двумя КООС, каждая из которых обслуживает от одного до четырех линейных трактов.

Система технического обслуживания позволяет организовать служебную связь по паре оптических волокон при аварийных ситуациях (с перерывом связи), а также по металлической паре при наличии прямых проводов на ГТС.

Система сигнализации выдает световую и акустическую сигнализацию при всех видах аварии и предаварийном состоянии оборудования, а также при поступлении вызова по служебной связи. Сигналы аварии индицируются на табло общественной, рядовой и стационарной сигнализации. Предаварийные сигналы индицируются только на табло отображения блока «Контроль стойки». На поврежденном оборудовании сигнализацию можно заблокировать.

Структурная схема cassette КООС-О приведена на рис. 7.8.

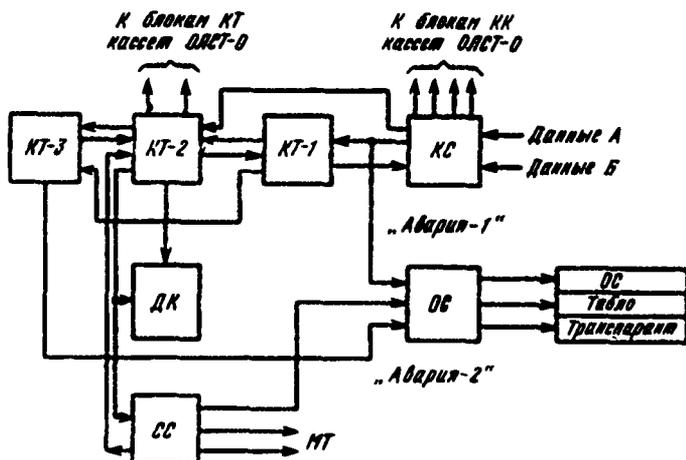


Рис. 7.8. Структурная схема КООС-О

Кассета КООС-П комплектуется теми же съемными блоками и отличается от КООС-О тем, что в ее составе отсутствует блок КТ-3.

В основе работы системы технического обслуживания ВОСП «Соната-2» лежит идея использования вышедшего из строя линейного световодного тракта для передачи сигналов локализации неисправности (телеконтроля) и служебной связи. При этом, как только датчики контроля фиксируют неисправность типа «Авария», весь линейный тракт (от станции А до станции Б) переключается в режим СО (системы обслуживания), т. е. по этому тракту вместо информационного сигнала передаются сигналы системы обслуживания.

В СО входят связанные и взаимодействующие между собой следующие подсистемы: контроля стоечного оборудования, контроля оборудования трактов, служебной связи и общестоечной сигнализации.

Подсистема контроля стоечного оборудования состоит из блоков контроля кассеты (КК), расположенных в кассетах КОЛСТ-О-2 (КОЛСТ-П-2), и одного блока контроля стойки (КС), расположенного в кассете КООС-О (КООС-П). Питание блоков КК осуществляется от вторичных источников питания кассеты КООС. Все КК и КС соединены двумя четырехразрядными шинами передачи данных (отдельно для направлений А и Б).

Блоки КК осуществляют первичный сбор информации с датчиков состояний (ДС), установленных в каждом блоке КОЛСТ-О-2 (КОЛСТ-П-2). Датчики состояний формируют сигналы о следующих предаварийных ситуациях: предаварийных значениях тока накачки излучателя (Прд) и коэффициента ошибок $10^{-3} > K_{\text{ош}} \geq 10^{-6}$ (ОШ). Кроме того, они формируют сигналы о следующих аварийных ситуациях: неисправности источников вторичного питания СН-1 (5; 12 В); пропадании сигнала НДВ-3 на входе блока ПК (стык с ВВГ) (МЧПИ); пропадании сигнала СМ1 на выходе блока ПК (ПК_{прд}); пропадании сигнала НДВ-3 на выходе блока ПК (стык с ВВГ) (ПК_{прм}); пропадании оптического сигнала на входе РЛ (ФД); пропадании сигнала СМ1 на выходе блока РЛ (РГ); превышении коэффициента ошибок ($K_{\text{ош}} \geq 10^{-3}$) в линейном сигнале в направлении А или Б.

Блок КС является вторичным звеном сбора информации о состоянии контролируемого оборудования. Он осуществляет запись в память, хранение, анализ и отображение информации о состоянии от одной до четырех кассет КОЛСТ. Блок КС взаимодействует также с подсистемой контроля трактов. При аварийной ситуации блок КС формирует сигнал «Авария-1», который поступает в блок контроля трактов КТ-1 для включения режима СО, а также в блок общестоечной сигнализации (ОС). При этом на табло индикации блока КС отображаются номер аварийного тракта и вид аварии. Предаварийные ситуации не вызывают включения режима СО, а только отображаются на табло.

Подсистема контроля оборудования линейных световодных трактов, содержащая блоки контроля трактов КТ-1—КТ-3 (последний только для КООС-О), входящие в состав кассет КООС, и блоки контроля трактов, установленные в кассетах КОЛСТ, работает только при включенном режиме СО. В этом режиме в линейном световодном тракте (ЛСТ) производится замена линейного информационного сигнала СМ1 на подобный ему вторичный сигнал системы обслуживания СМ1_{со}, имеющий ту же скорость передачи и закон кодирования. Этот сигнал не нарушает работы оборудования трактов и позволяет организовать канал телеконтроля и служебной связи, а также имеет регулярные особенности, по которым аппаратура отличает его от линейного сигнала. Замена сигнала СМ1 на СМ1_{со} происходит автоматически за счет появления последнего на приоритетном входе блока РЛ.

Инициатором включения режима СО могут являться:

блок КС при формировании сигнала «Авария-1»;

блок КТ-2 при обнаружении блоками КТ вторичного сигнала СО (СМ1_{со}), передаваемого по ЛСТ;

обслуживающий персонал при регламентных проверках ЛСТ с оконечных станций.

В первых двух случаях включение подсистемы контроля трактов происходит автоматически.

Блок КТ-1 взаимодействует с блоком КС путем обращения к памяти последнего при включении режима СО в системе. На основе данных, принятых из блока КС, он формирует сигнал телеконтроля. Блок КТ-1 также выдает сигналы для организации работы блока КТ-3 (в кассете КООС-О).

Блок КТ-2 вырабатывает тактовые импульсные последовательности, синхронизирующие работу кассеты ООС, блока КК, а также импульсы частотой 8,448 МГц, которые в режиме СО поступают в блоки КТ и преобразователя кода (ПК) для формирования сигналов СМ_{1СО} и СИАС (сигнал индикации аварийного состояния). Он выдает в блоки КТ команды на включение последнего в режим СО на основе информации, принятой из блоков КТ, КС и КТ-1, а также в блок КТ-1 команду на формирование сигнала телеконтроля (ТК). Кроме того, блок КТ-2 осуществляется:

синхронное объединение сигналов ТК и служебной связи (СС) в первичный сигнал СО со скоростью 64 кбит/с (сигнал СО_{А(Б)прд}) и выдачу его в блок КТ для образования передаваемого вторичного сигнала СО (СМ_{1СО}); прием первичного сигнала СО (СО_{А(Б)прм}), выделенного в блоке КТ, и разделение его на сигналы ТК и СС (ТК_{А(Б)прм} и СС_{прм} соответственно).

Блок КТ-3 осуществляет прием и запись в память информации телеконтроля, анализ данных и в случае фиксации аварийной ситуации выдачу в блоке ОС сигнала «Авария-2», отображение на табло номеров пункта, тракта и вида аварии.

Блок КТ входит в состав кассет КОЛСТ. Он определяет коэффициент ошибок в сигнале СМ₁ и анализирует его на предмет обнаружения сигнала СМ_{1СО}. В случае обнаружения последнего выделяется комплексный первичный сигнал СО приема со скоростью 64 кбит/с, который поступает в блок КТ-2. Кроме того, блок КТ принимает из КООС команду включения режима СО, тактовую частоту 8,448 МГц, а также комплексный первичный сигнал СМ_{1СО}, поступающий в ЛСТ. Текущий контроль состояния оборудования ЛСТ осуществляется обслуживающим персоналом на оконечных станциях по показателям табло отображения на блоках КС и КТ-3.

При работе подсистемы контроля трактов на обе оконечные станции передается вся информация о состоянии оборудования, хранящаяся в памяти блоков КС.

Информация о предаварийных ситуациях на промежуточном пункте может быть получена путем регламентной проверки ЛСТ.

Подсистема служебной связи представлена блоками служебной связи (СС), дельта-кодек (ДК) и КТ-2, входящими в состав кассет КООС, и блоками КТ, установленными в кассете КОЛСТ.

Блок СС имеет два режима работы: СС-1 и СС-2. Режим работы СС-1 предназначен для организации служебной связи по свободным металлическим парам проводов. В этом режиме выходы блоков «Линия» постоянно подключены к выделенной паре проводов.

Режим работы СС-2 предназначен для ведения служебных переговоров по ЛСТ во время действия подсистемы контроля трактов. С помощью блока ДК речевой сигнал с микрофона преобразуется в цифровой (сигнал СС_{прд}), который синхронно объединяется с данными ТК в блоке КТ-2, образуя комплексный первичный сигнал СО. На приемной стороне из принятого сигнала СО_{прм} в блоке КТ-2 выделяется сигнал СС_{прм}, который преобразуется в блоке ДК в аналоговую форму и поступает на микрофонную трубку (МТ). В обоих режимах имеется возможность передачи сигнала избирательного вызова с отображением на приеме в виде звуковой и световой сигнализации.

При отсутствии свободных металлических пар для служебной связи служебные переговоры обслуживающего персонала при работающих ЛСТ могут осуществляться между оконечными пунктами с использованием слу-

жебного канала связи на оборудовании ВВГ, а между оконечными и промежуточными пунктами — по городской телефонной сети.

Подсистема общестоечной сигнализации состоит из блока ОС, табло аварийной сигнализации стойки (три лампы на верхней раме стойки), а также звонков (аварии и вызова по СС), устанавливаемых вне стойки на пультах станционной сигнализации. К блоку ОС могут быть дополнительно подключены табло рядовой и станционной сигнализации. На выходы блока ОС поступают следующие сигналы: «Авария-1» от блока КС; «Авария-2» от блока КТ-3; сигнал о пропадании напряжения +5 В в КООС; сигнал вызов по служебной связи от блока СС и сигнал проверки.

Блок ОС формирует следующие выходные сигналы: включение реле аварийной сигнализации; включение реле служебной связи; включение реле выключения звонка; включение звонка аварии и звонка служебной связи.

7.2.2. Аппаратура ИКМ-120-5

Оборудование линейного тракта аппаратуры ИКМ-120-5 содержит:

блок ОЛТ-24, предназначенный для организации электропитания и контроля оборудования оптического линейного тракта с помощью устройства сервисного обслуживания УСО-01;

комплекты КЛТ-2С, устанавливаемые в блок ОЛТ-24 и предназначенные для организации оптического линейного тракта на длине волны 0,85 и 1,3 мкм с возможностью использования в качестве источников излучения как лазерных, так и светоизлучающих диодов;

блок оборудования для световодных подключений ОСП-22, предназначен для стыка линейного и станционного оптических кабелей.

На оконечной станции в каждом линейном тракте используется один комплект КЛТ-2С.

При этом цифровой поток, сформированный на выходе оборудования вторичного временного группообразования (ОВГ-21), в стыковом коде НДВ-3 поступает на вход комплекта КЛТ-2С, который обеспечивает преобразование цифрового потока в линейный код МСМ1, преобразование электрического сигнала в оптический и передачу линейного сигнала по оптическому кабелю, а также прием и обратное преобразование оптического сигнала в электрический, регенерацию линейного сигнала и обратное преобразование из линейного кода МСМ1 в стыковой код НДВ-3. Структурная схема оборудования линейного тракта ИКМ-120-5 дана на рис. 7.9.

На промежуточной станции в каждом линейном тракте используются два комплекта КЛТ-2С. При этом оборудование линейного тракта осуществляет трансляцию линейного сигнала, т. е. обеспечивает прием, регенерацию и передачу линейного сигнала в обоих направлениях линейного тракта.

Для оборудования, работающего в диапазоне длин волн 0,85 мкм, используются оптические кабели марки ОК-50, в диапазоне длин волн 1,3 мкм — оптические кабели марки ОЗКГ-1, а после 1992 г. оптические кабели марки ОКК.

Система контроля предназначена для контроля оборудования оконечных и промежуточных станций с помощью блока УСО-01, расположенного на этих же станциях.

Система телеконтроля, т. е. система передачи сигналов контроля с промежуточных на оконечные станции, отсутствует. Организация телеконтроля должна осуществляться центрами технической эксплуатации ГТС через устройство сервисного оборудования УСО-01.

Система служебной связи между промежуточными и оконечными станциями, т. е. возможность организации служебных разговоров по оптическому линейному тракту, отсутствует. Организация системы служебной связи должна осуществляться центрами технической эксплуатации ГТС через блоки УСО-01.

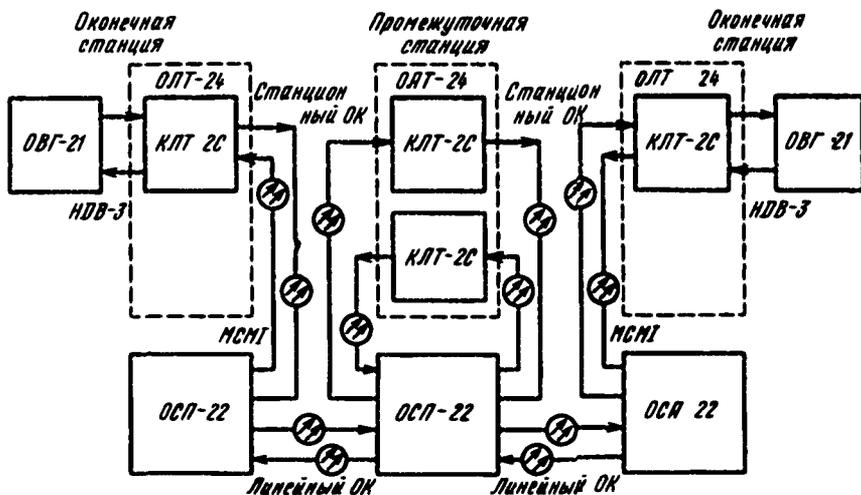


Рис. 7.9. Структурная схема линейного тракта аппаратуры ИКМ-120-5

Оборудование оптического линейного тракта питается от источника постоянного тока напряжением $60 \begin{matrix} +2 \dots 6 \\ +12 \end{matrix}$ В, положительный полюс заземлен.

Условия эксплуатации оборудования: температура окружающего воздуха $5 \dots 40^\circ \text{C}$, относительная влажность до 95% при температуре до 30°C .

Конструктивно оконечная и промежуточная станции выполнены в виде функционально законченных блоков оборудования линейного оптического тракта. Каждый блок рассчитан на обработку одного вторичного цифрового потока, соответствующего 120 каналам ТЧ.

Как оконечные, так и промежуточные станции устанавливаются в зданиях АТС (расположенных вдоль трассы линии).

Оборудование оптического линейного тракта на оконечной и промежуточной станциях размещается в унифицированных стоечных каркасах СКУ-01 размером $2600 \times 600 \times 225$ мм. В стойке СКУ-01 может размещаться до 11 типовых блоков. Масса стойки СКУ-01 равна 70 кг, блоков ОЛТ-24 и ОСП-22 — соответственно 8,5 и 10 кг, а комплекта КЛТ-2С — 1,5 кг. На верхней раме стоечного каркаса имеются лампы сигнализации и клеммы ввода цепей питания. В правой боковой стенке расположены шины питания и сигнализации.

Блок ОЛТ-24 предназначен для организации линейного световодного тракта вторичной цифровой системы передачи ИКМ-120-5 при установке в него комплектов КЛТ-2С. Габаритные размеры блока $595 \times 223 \times 238$ мм. С лицевой и задней сторон блок ОЛТ-24 закрывается крышками, между платами в блоке установлены стальные экраны, соединенные с общей шиной на кроссплате. Электрические соединения между платами блока и комплектов КЛТ-2С выполняются на кроссплате через разъемы СМП49. Соединения с внешними цепями, а также подсоединения станционных оптических кабелей производятся через разъемы и соединители, расположенные на платах с лицевой стороны. Над блоком оставлено место для укладки излишков станционного оптического кабеля, которые крепят к блоку ремнями. Здесь же к блоку подходят кабели и провода для соединений с внешними цепями. На лицевой крышке блока в правом нижнем углу имеется отверстие, через которое видна колодка с индикатором красного цвета и надписью. Свечение индикатора сигнализирует о наличии в блоке (или комплектах) аварий.

Блок ОСП-22 конструктивно унифицирован с типовыми блоками аппаратуры ИКМ-120-4/5, устанавливается в верхней части стойки и пред-

назначен для стыка двух линейных и 16 станционных оптических кабелей. Сращивание оптических волокон линейного и станционного кабелей осуществляется методом сварки. Место сварного соединения защищают с помощью устройства для герметизации (муфты). Излишки волокон (запас) укладывают в кассеты блока. Блок позволяет организовать на промежуточном пункте четыре, а на оконечном — восемь линейных трактов.

На задней стенке блока имеются конструкции: с накладками для крепления линейных оптических кабелей; с крышками для крепления восьми станционных оптических кабелей; с крышками для разводки модулей линейных и станционных оптических кабелей.

С лицевой и задней сторон блок закрыт крышками.

Расстояние от блока ОСП-22 до оборудования линейного тракта должно быть не более 15 м.

Контроль за состоянием оборудования линейного световодного тракта осуществляется блоком УСО-01. Блок выполняет следующие команды: отключение звонка; подключение выделителя ошибок плат РС к общественной магистрали; общий сброс всех команд.

Блок передает на устройство отображения информации сигналы о следующих видах аварий:

- пропадание входного станционного сигнала;
- отсутствие выходного оптического сигнала (авария излучателя);
- поврежден вторичный источник питания;
- пропадание входного оптического сигнала;
- пропадание выходного станционного сигнала;
- повышенный коэффициент ошибок;
- отсутствие платы (в блоке ОЛТ-24);
- поврежден первичный источник питания.

Комплект КЛТ-2С предназначен для организации линейного световодного тракта вторичной цифровой системы передачи для городских телефонных сетей и устанавливается в блок ОЛТ-24. В комплект каждого КЛТ-2С входят два отрезка станционных оптических кабелей длиной 30 м с разъемным оптическим соединителем на одном конце. Назначение комплектов:

- КЛТ-24 . . . Для регенерационного участка с затуханием до 37 дБ на длине волны 1,3 мкм
- КЛТ-25 . . . Для регенерационного участка с затуханием до 50 дБ на длине волны 0,85 мкм
- КЛТ-26 . . . Для регенерационного участка с затуханием до 24 дБ на длине волны 1,3 мкм
- КЛТ-27 . . . Для регенерационного участка с затуханием до 34 дБ на длине волны 0,85 мкм

Средняя мощность оптического сигнала на входе и выходе комплекта при $K_{\text{осл}} = 10^{-9}$ не менее величин, указанных в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Комплект	Мощность оптического сигнала, дБм	
	на выходе	на входе
КЛТ-24	-3	-40...-10
КЛТ-26	-16	...
КЛТ-25	0	-50...-20
КЛТ-27	-16	...

Таблица 7.2

КЛТ-24	КЛТ-25	КЛТ-26	КЛТ-27
ПД-24 ПР-22 РС-22	ПД-25 ПР-25 РС-22	ПД-26 ПР-22 РС-22	ПД-27 ПР-25 РС-22

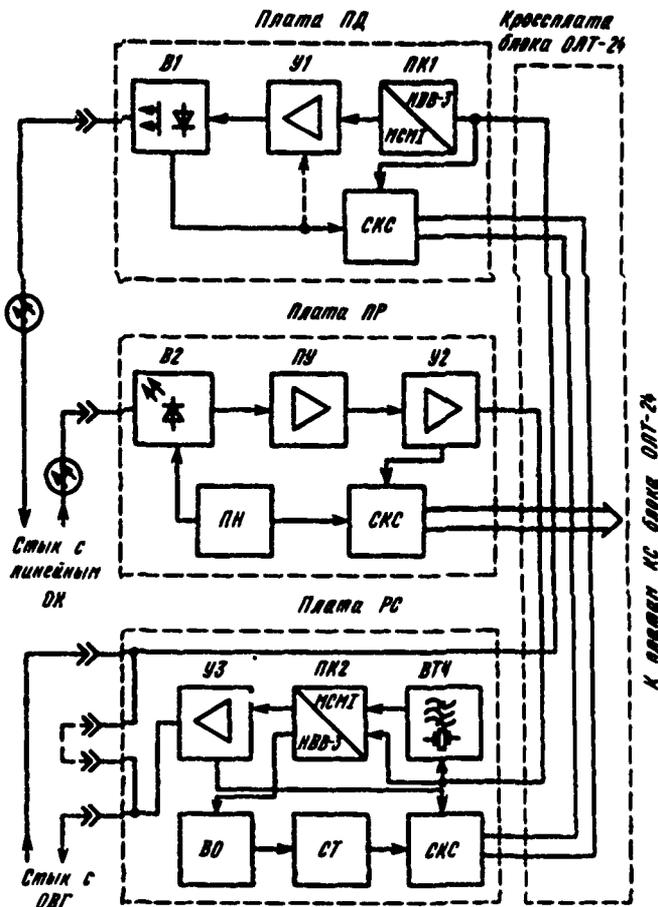


Рис. 7.10. Структурная схема комплекта КЛТ-2С

Комплект КЛТ-2С (рис. 7.9) состоит из набора трех типовых элементов замены: плат ПД, ПР и РС (табл. 7.2).

При использовании комплекта в качестве промежуточного ретранслятора оптического сигнала электрические вход и выход комплекта (стык с ОВГ) соединяют с помощью перемычки на плате РС (на рис. 7.10 показано штриховой линией). Для ретрансляции оптического сигнала в регенерационном пункте в двух направлениях в блок ОЛТ-24 устанавливают два комплекта.

Плата ПД предназначена для преобразования электрического информационного сигнала в коде НВВ-3, поступающего через стык с ОВГ, в линейный оптический сигнал в коде МСМ1, а также для формирования сигналов аварии по запросу блока ОЛТ-24. Электрический сигнал преобразуется лазерным диодом в оптическое излучение, которое через оптический соединитель вводится в ОК. Электрический сигнал, вырабатываемый фотодиодом, управляет схемой автоматической регулировки мощности.

Система контроля и сигнализации (СКС) контролирует наличие входного электрического сигнала («Авария-1») и превышение током накачки излучателя предельно допустимой величины («Авария-2»).

Плата ПР предназначена для преобразования линейного оптического сигнала в коде МСМ1 в электрический и усиления электрического сигнала до величины напряжения сигналов логических 0 и 1. Оптический сигнал из ОК через оптический соединитель поступает на лавинный фотодиод В2. Преобразователь напряжения (ПН) создает напряжение смещения на В2. Электрический сигнал усиливается в предварительном (ПУ) и главном (У2) усилителе и поступает на плату РС-22. Система СКС контролирует напряжение смещения лавинного фотодиода («Авария-1») и наличие входного оптического сигнала («Авария-2»).

Плата РС предназначена для преобразования принятого сигнала в коде МСМ1 в сигнал в коде HDB-3, стыка с ОВГ, выделения и подсчета ошибок в оптическом тракте и для передачи сигналов об авариях в блок ОЛТ-24. Выделитель тактовой частоты (ВТЧ) выделяет из входного сигнала тактовую частоту, поступающую в преобразователь кода ПК2, где происходит преобразование кодов. Импульсы в коде HDB-3 объединяются в усилителе сигнала стыка комплекта с ОВГ У3, и квазитрочный сигнал подается на разъем стыка с ОВГ. В выделителе ошибок (ВО) происходит выделение ошибок (обнаруживается двойное повторение полярности импульсов), которые затем считываются счетчиком (СТ) в течение определенного промежутка времени; при заполнении памяти СТ вырабатывает сигнал о повышении коэффициента ошибок. Система СКС контролирует наличие выходного сигнала на плате РС-22 («Авария-1») и повышенный коэффициент κ («Авария-2»).

7.3. Аппаратура ВОСП для внутризонных сетей

Аппаратура ВОСП «Сопка-2» и «Сопка-3» содержит:
стандартное каналобразующее (стойки САЦО, СВВГ, СТВГ);
стойки оборудования линейного тракта (СОЛТ-О) для передачи вторичного и третичного цифровых потоков со скоростью 8,448 Мбит/с и 34,368 Мбит/с;

стойку телемеханики и служебной связи (СТМСС);
оборудование линейного тракта, устанавливаемое в необслуживаемом регенерационном пункте;
стойку дистанционного питания (СДП-О);
специализированную контрольно-измерительную аппаратуру;
комплект инструментов и приспособлений для монтажа оптического кабеля.

Параметры стыков оборудования временного группообразования с аппаратурой «Сопка-2» и «Сопка-3» соответствуют ГОСТ 26886—86 для вторичного и третичного стыков.

Стандартные цифровые стыки предусмотрены в оконечном оборудовании, размещаемом как на оконечных (ОП), так и обслуживаемых регенерационных пунктах (ОРП), что позволяет при необходимости осуществлять выделение цифровых трактов или отдельных каналов.

Максимальная проектная длина регенерационного участка между НРП и ОП и ближайшими НРП приведена в табл. 7.3.

Минимально проектная длина регенерационного участка (с учетом динамического диапазона АРУ 20 дБ) приведена в табл. 7.4.

Оборудование линейного тракта состоит из оборудования оконечного, обслуживаемого и необслуживаемого регенерационных пунктов. Конструктивно оборудование ОП и ОРП размещается в стойке оборудования линейного тракта СОЛТ-О (2600×120×266 мм), стойке телемеханики и служебной связи СТМСС (2600×120×225 мм) и стойке дистанционного питания СДП-О (2600×120×266 мм).

Таблица 7.3

Аппаратура	Длина регенерационного участка, км, при затухании, дБ/км		
	0,7	1,0	1,5
«Сопка-2»	33,2	26,5	19,2
«Сопка-3»	30,5	24,4	18,2

Таблица 7.4

Аппаратура	Минимальная длина участка, км, при затухании, дБ/км		
	0,7	1,0	1,5
«Сопка-2»	15,2	12,0	9,0
«Сопка-3»	12,0	10,0	7,5

Оборудование оконечных и обслуживаемых пунктов предназначено для эксплуатации в отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха 5...40° С, относительной влажности воздуха до 80% при температуре 25° С и давлении до $6 \cdot 10^4$ Па.

Стойка СОЛТ-О обслуживает два линейных тракта и выпускается в четырех модификациях, указанных в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Тип стойки	Напряжение питания, В	Скорость передачи по электрическому стыку, Мбит/с
СОЛТ-О	—24	34,368
СОЛТ-О-1	—24	8,448
СОЛТ-О-2	—60	34,368
СОЛТ-О-3	—60	8,448

Принцип работы аппаратуры линейного тракта представлен на рис. 7.11. Трехуровневый стыковой сигнал в коде HDB-3 по стационарному электрическому кабелю поступает от оборудования временного группообразования на вход стойки СОЛТ-О, где происходит его преобразование в двухуровневый сигнал с линейным кодом 5В6В при одновременном увеличении скорости (с 8,448 до 10,137 Мбит/с или с 34 до 41 Мбит/с).

Сигналы систем служебной связи и телемеханики объединяются с информационным сигналом в передающей части стойки СОЛТ-О методом ЧРК и передаются в нижней части спектра линейного сигнала. Объединенный информационный электрический сигнал поступает на вход платы передачи (ПП), на которой установлен лазер. С выхода лазера оптический сигнал, представляющий собой последовательность световых импульсов в коде 5В6В, подается в оптический станционный кабель, который в УССЛК состыкован с линейным кабелем. В блоках линейного регенератора РЛ-0 контейнера НРП ослабленный в линейном кабеле оптический сигнал регенерируется; при этом сначала производится его оптоэлектронное преобразование, а после восстановления сигнала — электронно-оптическое.

На стойке СОЛТ-О противоположного ОП происходит обратное преобразование сигнала, т. е. оптический сигнал преобразуется в электрический, из него выделяются сигналы СС и ТМ и производится преобразование в сигнал со стыковым кодом МЧПИ (HDB-3).

При отсутствии стыкового сигнала от ОВГ, а также приемного сигнала со стойки СОЛТ-О в линию передается сигнал индикации аварийного состояния (СИАС) для оповещения ОРП и противоположного ОП.

Стойка телемеханики и служебной связи предназначена для: сбора и отображения информации о положении датчиков на контролируемых ОП, ОРП и НРП по двум световодным волокнам в цифровом виде в низкочастотной части спектра совместно с информационным сигналом;

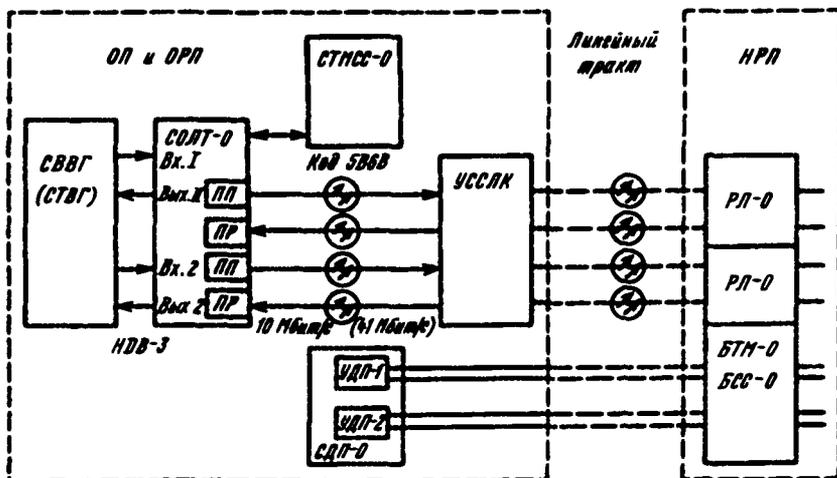


Рис 711 Структурная схема ВОСП «Сопка-2» и «Сопка-3»

организации оперативной телефонной связи эксплуатационно-технического персонала между ОП, ОРП и НРП по двум световодным волокнам совместно с информационным сигналом

Стойка СТМСС обслуживает два линейных тракта при установке на ОП или четыре (по два в каждую сторону) при установке на ОРП. Если на ОРП один тракт выделяется, а второй транзитный, то необходимо устанавливать две стойки СТМСС.

Оборудование ТМ стойки СТМСС имеет два режима работы ОП_{г.л} (главный оконечный пункт) и ОРП. В режиме ОП_{г.л} работает оборудование ТМ, установленное на одном из двух ОП. На другом ОП и всех ОРП оборудование ТМ работает в режиме ОРП.

Оборудование ТМ, работающее как в режиме ОП_{г.л}, так и в режиме ОРП, выполняет следующие функции: формирование сообщений о переходе датчиков извещения из одного состояния в другое, прием команд управления и передача по этим командам сообщений о состоянии датчиков, контроль работоспособности оборудования ТМ. Оборудование ТМ, работающее в режиме ОП_{г.л}, кроме названных выполняет следующие дополнительные функции: формирование команд управления и передачу их на все контролируемые пункты (КП) НРП, ОРП, ОП, прием и отображение сообщений, поступающих со всех КП, а также передачу этих сообщений в исполнительный пункт секции технического обслуживания (СТО ИП) системы АСОТ ЕАСС.

Оборудование ТМ, работающее в режиме ОРП, дополнительно выполняет такие функции, как прием и отображение сообщений, поступающих с КП, входящих в секцию обслуживания данного ОРП.

Принцип совместной работы оборудования ТМ стойки с другими КП системы следующая. Для обмена информацией между КП выделены два канала ВОСП: один канал осуществляет передачу со стороны ОП_А в сторону ОП_Б, а другой — со стороны ОП_Б в сторону ОП_А с ретрансляцией сигналов в обе стороны в промежуточных пунктах.

Сбор информации о состоянии датчиков извещения в системе телеконтроля осуществляется методом централизованного адресно-циклического опроса.

Сигнал служебной связи кодируется в плате кодека стойки СТМСС методом адаптивной дельта-модуляции со слоговым компандированием при скорости передачи 32 кбит/с.

Посылка исходящего вызова абонентам ОРП (ОП) обеспечивается с помощью номеронабирателя. При снятии микрофонной трубки абонент прослушивает сигнал готовности станции к набору номера. Первая цифра номера определяет выбор направления передачи (А или Б) или характер вызова для абонентов ОП (обычный или с приоритетом). Две последующие цифры определяют номер вызываемого абонента. Абонент подключается к каналу параллельно и определяет занятость канала путем его прослушивания. Если канал свободен, набирают две последующие цифры.

Размещается оборудование ТМ и СС на ОП и ОРП в стойке СТМСС, а в НРП — в блоках БТМ-О и БСС-О (см. рис. 7.11).

Стойка СТМСС имеет две модификации в зависимости от питания: СТМСС и СТМСС-А. Питание стойки СТМСС осуществляется от источника постоянного тока напряжением $24 \pm 2,4$ В с заземленным полюсом, а стойки СТМСС-А — от источника постоянного тока напряжением $60 \pm 6,0$ В с заземленным полюсом.

На стойке должна срабатывать сигнализация при пропадании напряжения на выходах источников вторичного электропитания. Потребляемый ток не должен превышать: 1,5 А — для первого фидера СТМСС; 0,35 А — для второго фидера СТМСС; 1,0 А — для первого фидера СТМСС-А, 0,15 А — для второго фидера СТМСС-А.

Комплект блоков НРП обеспечивает передачу по каждой паре оптических волокон цифровых потоков совместно с сигналом СС и ТМ. Оптический сигнал через блочную часть оптического соединителя поступает на оптический линейный регенератор (РЛ-О). В блоке производится оптоэлектронное преобразование лавинным фотодиодом, после чего сигнал усиливается, из него выделяются низкочастотные сигналы ТМ и СС, которые подаются соответственно в блоки телемеханики и сервисного обслуживания (БТМ-О и БСС-О). Информационный сигнал поступает на видеорегенератор, где восстанавливается по амплитуде и временному положению и объединяется с сервисными сигналами ТМ и СС. Объединенный сигнал преобразуется в оптический с помощью лазерного диода и излучается в кабель.

Аппаратура НРП для двух систем передачи размещается в унифицированном контейнере группового типа.

Электропитание оборудования линейного тракта ОП и ОРП рассчитано на работу от источника постоянного тока напряжением $-24 \pm 2,4$ В или $-60 \pm 6,0$ В с заземленными положительными полюсами. Электропитание оборудования НРП рассчитано на работу от устройства дистанционного питания (УДП) по отдельно проложенному кабелю, либо от автономного источника питания, либо по медным жилам оптического кабеля. Стойка дистанционного питания (СДП-О) обеспечивает электропитание до двух НРП по одному в каждую сторону. В исключительных случаях возможна организация питания с оконечного пункта оборудования двух НРП в одну сторону. При этом оборудование обеих систем передачи в каждом из НРП должно питаться по отдельной паре от своего устройства дистанционного питания. Ток, потребляемый СДП-О от основного источника питания минимальным напряжением 21,6 и 54 В, не должен быть более: 12 А по каждому фидеру для СДП-0-24 и 7 А по каждому фидеру для СДП-0-60. Масса стойки СДП не более 60 кг.

Питание стоек осуществляется со стационарных электропитающих установок постоянного тока напряжением $-24,0 \pm 2,4$ В для СДП-О-24 и $60,0 \pm 6,0$ В для СДП-О-60.

В качестве автономного источника питания НРП предполагается использовать термоэлектрический генератор (ТЭГ) или радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ) (см. § 7.4).

7.4. Аппаратура ВОСП для магистральных линий связи

Комплекс четвертичной ВОСП «Сопка-4» обеспечивает передачу стандартных четвертичных цифровых сигналов со скоростью 139,264 Мбит/с по магистральному оптическому кабелю из четырех или восьми одномодовых оптических волокон с коэффициентом затухания не более 0,7 дБ/км при работе в диапазоне длин волн 1,3 мкм.

Комплекс «Сопка-4» обеспечивает передачу всех видов информации, предусмотренных ЕАСС, и позволяет организовать по одному линейному тракту 1920 каналов ТЧ. В комплексе аппаратуры предусмотрена возможность введения и выделения отдельного дополнительного первичного цифрового сигнала со скоростью 2,048 Мбит/с на НРП и ОРП.

Комплекс аппаратуры «Сопка-4» предусматривает возможность независимого и раздельного ввода в эксплуатацию линейных трактов с занятием свободных волокон кабеля по мере необходимости наращивания емкости магистральной кабельной линии связи.

Структурная схема линейного тракта приведена на рис. 7.12. Комплекс аппаратуры «Сопка-4» содержит стойку оборудования линейного тракта (СОЛТ-4-О), стойку телемеханики (ТМ), стойку и участковой (УСС) и постанционной (ПСС) служебной связи и аппаратуру регенерационного пункта (АРП-4-О).

Оборудование стойки СОЛТ-4-О выполняет следующие функции:
прямое и обратное преобразование сигнала стыка СМ1 в линейный сигнал 10В1Р1R;
преобразование электрического сигнала в оптический и обратно;
ввод и вывод в структуру линейного сигнала информации оборудования ТМ и СС;
контроль и измерение коэффициента ошибок линейного сигнала;
контроль качества работы узлов линейного оборудования;
преобразование сервисных сигналов к виду, удобному для связи с оборудованием СС, ТМ и СТО-ИП по цепям, подверженным воздействию электромагнитных излучений;

распознавание и формирование сигналов СИАС.

В поставляемую стойку СОЛТ-4-О входят:

пять источников вторичного электропитания (ИВЭП), поставляемым по техническим условиям РХО.323.012 ТУ;

трехрядная секция оборудования линейного тракта передающая (ОЛТ-П), в состав которой входят две платы размером 100×160 мм: кодер (КД) и скремблер—дескремблер (СК—ДСК) и две платы размером 210×160 мм — формирователь сигнала передачи (ФСП) и корректор передающий (КРП);

четырёхрядная секция оборудования линейного тракта приемная (ОЛТ-ПР), в состав которой входят пять плат размером 210×160 мм: устройство приемное оптоэлектронное оконечное (УПРО-О), устройство восстановления сигнала оконечное (УВС-О), устройство преобразования сигнала оконечное (УПС-О), устройство коммутации и синхронизации (УКС), формирователь сигнала приема (ФСПР);

однорядная секция декодирования (ДКД), в составе которой две платы размером 100×160 мм: декодер (ДКД), скремблер—дескремблер;

двухрядная секция оборудования контроля (ОК), в составе которой три платы размером 210×160 мм: плата стыка (ПС), плата реле и задающего генератора (ПРЛ-ЗГ), устройство детектирования и контроля ошибок (УДКО);

двухрядная секция оборудования сопряжения каналов (ОСК), в состав которой входит плата модулятор—демодулятор сигналов ТМ (МДМС-ТМ) размером 210×160 мм.

Перечисленные секции являются съемными, межплатное соединение в них осуществляется через объединительные платы.

Устройство передающее оптоэлектронное оконечное (УПО-О) занимает съемную плату размером 100×160 мм и размещается в однорядной секции.

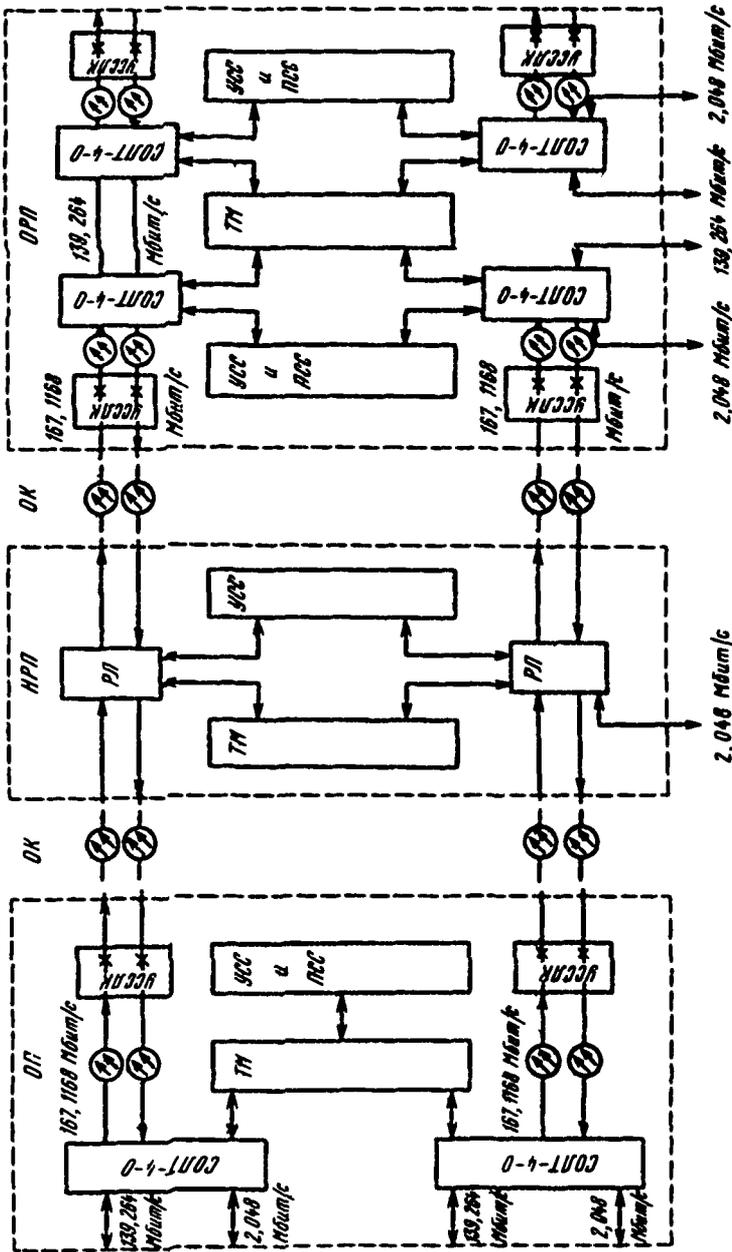


Рис. 7.12. Структурная схема ВОПИ «Сопка-4»

Секция устройства ввода (УВ) — однорядная и несъемная

Все секции имеют лицевые панели с гравировкой названий секций, устройства коммутации и индикации. На каркасах секций есть гравировка названий плат в соответствии с их месторасположением в секции

В верхней части стойки расположены разъемы для подключения первичного электропитания и интерфейсного оборудования. Подключение аппаратуры ЧВГ и ИКМ-30, а также измерительных приборов осуществляется на секции УВ

Принцип работы стойки СОЛТ-4-О следующий. Сигнал стыка СМ1 поступает в кодер со скоростью 139,264 Мбит/с, где происходит преобразование в сигнал NRZ без изменения скорости. Далее сигнал NRZ через скремблер поступает на вход ФСП, который осуществляет формирование сигнала 10В1Р1R, передаваемого со скоростью 167,1168 Мбит/с и содержащего помимо информационного сигнала еще и сигналы СС. С выхода ФСП сигнал 10В1Р1R поступает в КРП, где происходит компенсация дрейфа постоянной составляющей. После чего в сигнал вводится информация ТМ, поступающая с модулятора платы МДМС-ТМ. Полученный на выходе КРП сигнал поступает в УПО-О и далее через оптический разъем — в оптический кабель.

Линейный сигнал из оптического кабеля со скоростью 167,1168 Мбит/с поступает на вход УПРО-О, в котором осуществляется преобразование оптического сигнала в электрический. Преобразованный сигнал поступает на вход УВС-О, которое регенерирует импульсы сигнала по амплитуде, длительности и положению на тактовом интервале. Регенерированный сигнал поступает на вход УПС-О, которое формирует из линейного сигнала два потока с одновременным понижением скорости до 83,558 Мбит/с. В УКС осуществляется вхождение сигнала в синхронизм и выделение двух потоков информации служебной связи: станционной (ПСС) и участковой (УСС). Далее УКС объединяет оба полупотока в один. После выделения из линейного сигнала всей сервисной информации в ФСПР происходит преобразование сигнала 10В1Р1R в сигнал NRZ с понижением скорости сигнала до 139,264 Мбит/с. Полученный с выхода ФСПР сигнал NRZ поступает на дескремблер и далее на ДКД, на выходе которого формируется сигнал стыка СМ1, передаваемый со скоростью 139,264 Мбит/с. В случае пропадания линейного сигнала на выходе ДКД появляется сигнал СИАС.

Стойка СТМ предназначена для работы в составе ОРП, промежуточных (ПП) и оконечных (ОП) пунктов комплекса магистральных световодных цифровых систем передачи. Она осуществляет сбор и обработку информации, поступающей с датчиков НРП, расположенных в зоне обслуживания данной станции, передачу информации на устройства, отображение и документирование этой информации, передачу информации о состоянии станционных датчиков ТМ на другие пункты контроля,

организацию канала передачи данных для обмена информацией с УВК, ретрансляцию информации со стороны А на сторону Б и наоборот, передачу информации в СТО-ИП технику на дом.

Обмен информацией между стойкой СТМ и линией связи осуществляет через стойку СОЛТ-4-О. Стойка СТМ содержит

функциональный модуль «Электроника С5-2200» — одноплатную микроЭВМ,

функциональный модуль «Электроника С5-2205» — оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) динамического типа с аппаратной регенерацией объемом 16К 16-разрядных слов;

функциональный модуль «Электроника С5-2213М1» — постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) объемом 8К 16-разрядных слов и электрически программируемое постоянное запоминающее устройство (ЭППЗУ) объемом 8К 16-разрядных слов. При этом ПЗУ содержит системные программы, используемые при работе устройства ТМ, а ЭППЗУ — программы пользователя, обеспечивающие функционирование устройства ТМ;

блок ввода информации, предназначенный для ввода в микроЭВМ данных о структуре магистрали и состоянии местных датчиков ТМ; блок преобразователя, предназначенный для сопряжения микроЭВМ со стойкой СОЛТ, обеспечивающей выход в линию связи;

блоки сигнализации, обеспечивающие как стоечную сигнализацию, так и передачу сигналов на СТО

Стойка служебной связи (ССС) предназначена для организации оперативной телефонной связи эксплуатационно-технического персонала между ОП, ОРП и НРП по световодным волокнам в цифровом виде.

Для обеспечения нормальной эксплуатации оборудования линейного тракта и линейно-кабельных сооружений в стойки входят устройства постанционной (ПСС) и участковой служебной связи (УСС). Постанционная служебная связь ПСС предназначена для организации связи между ОП и ОРП, а УСС — между смежными ОРП и ОП, а также ОРП НРП.

Размещаемое на стойке оборудование служебной связи позволяет организовать по два канала ПСС и УСС. Сигналы приема и передачи по каналам представляют собой цифровой сигнал с импульсно-кодовой модуляцией и тактовой частотой 32 кГц. Оборудование стойки ССС предусматривает возможность ответвления каналов ПСС и УСС со стандартными уровнями на приеме и передаче. На стойке имеются два выхода для подключения телефонных аппаратов. Телефонные аппараты подключаются по четырехпроводной схеме и могут быть удалены от стойки на расстояние не более 3 км. Кроме того, на стойке предусмотрена возможность ручной коммутации (при помощи шнуров) канала УСС с каналом ПСС.

Эффективно передаваемая полоса частот составляет 0,3 . 3,4 кГц. Номинальная величина остаточного затухания каналов служебной связи на частоте 0,8 кГц составляет 13 дБ.

Вызов ОРП (ОП) из НРП осуществляется голосом через громкоговоритель или по каналам телемеханики, а вызов НРП из ОРП (ОП) осуществляется через громкоговоритель. Вызов между ОРП (ОП) — импульсный, избирательный, с применением номеронабирателя. Соединение абонентов по каналам служебной связи осуществляется автоматически

Аппаратура регенерационного пункта АРП4-О размещается в каркасе унифицированного грунтового контейнера полуподземного типа и работает следующим образом. Входной оптический сигнал с линии поступает по ОК через оптическое вводно-кабельное устройство на блок линейного регенератора, который предназначен для приема, регенерации и передачи по одномодовому ОК «Квант-М» информационного сигнала со скоростью 167,117 Мбит/с, а также выделения и ретрансляции сигналов СС и ТМ, передача которых осуществляется совместно с информационным сигналом в каждом линейном тракте.

Выделенная из информационного сигнала служебная информация (сигналы участковой служебной связи и телемеханики направлений А и Б) поступает на блок резервного канала (БРК), куда также поступают сигналы с выходов детекторов ошибок и сигналы аварий узлов блока линейного регенератора (БРЛ).

Блок резервного канала (БРК) предназначен для подсчета $K_{\text{ош}}$ в информационном сигнале и организации стыка БРЛ с блоком телемеханики и служебной связи (БТМСС). Выходные сигналы с БРК поступают на БТМСС, который предназначен для.

сбора информации о работоспособности узлов аппаратуры, режиме работы автономного источника питания, состоянии контейнера (датчики люка, появления воды и контроля давления) и формирования обобщенного сигнала ТМ, который передается совместно с линейным сигналом;

цифро-аналогового преобразования сигнала ТЧ, формирования сигналов служебной связи для подключения аппарата обходчика, радиостанции типа «Лен», а также формирования сигнала СС в цифровом виде для передачи по линейному тракту совместно с информационным сигналом.

Устройство питания предназначено для преобразования и стабилизации напряжений тока, вырабатываемых автономным источником питания и необходимых для питания АРП4-О.

Электропитание аппаратуры линейного тракта, размещаемой на обслуживаемых пунктах, предусматривается от источников постоянного тока —24 или —60 В.

Питание аппаратуры, размещаемой в унифицированном грунтовой контейнере полуподземного типа, осуществляется от автономного источника питания электрической энергии постоянного тока РИТЭГ.

Мощность, потребляемая блоками линейных регенераторов, телемеханики и служебной связи, не более 45 Вт (на одну систему передачи). В качестве источника питания используется РИТЭГ-90-30/7 НСНУ-С. Ресурс работы РИТЭГ — 10 лет. Один РИТЭГ является источником электропитания для двух систем передачи «Сопка-4». При организации четырех систем необходимо два РИТЭГ. Устанавливается РИТЭГ в цельнометаллическом сварном контейнере, защищающем его от внешних воздействий. Для отвода тепла в окружающую среду имеется радиатор. Габаритные размеры РИТЭГ в корпусе 850×1230 мм, масса не более 1200 кг.

Габаритные размеры стойки СОЛТ-4-Т 2600×120×240 мм, стойки СТМ — 2600×600×240 мм, стойки служебной связи — 2600×120×240 мм, НРП — 610×607×576 мм.

Глава 8

Измерения

8.1. Назначение и виды измерений

В процессе производства оптических кабелей, строительства и технической эксплуатации линейных трактов цифровых ВОСП выполняют комплекс измерений для определения состояния кабелей и качества функционирования аппаратуры линейного тракта, предупреждения повреждений, а также накопления статистических данных для разработки мер повышения надежности связи.

Параметры и характеристики оптических кабелей и аппаратуры линейного тракта, поставляемых предприятиями-изготовителями, измеряют в производственных условиях и оформляют в виде паспортных данных, которые должны соответствовать действующим нормам ГОСТов и ТУ. Для таких измерений используют, как правило, специализированную аппаратуру, работающую в автоматизированном режиме.

В процессе строительства измеряют следующие параметры, позволяющие контролировать качество строительства и связи; затухание, вносимое срезками кабелей, затухание оптических волокон на строительных длинах и на полностью смонтированных участках регенерации, а также уровни мощности оптического излучения на выходах передающих и входах приемных оптоэлектронных модулей и коэффициент ошибок. При необходимости определяют места повреждений.

Измерения затуханий оптических волокон на строительных длинах выполняют в обоих направлениях передачи участков регенерации, что позволяет учесть различия значений измеряемых величин, обусловленные неоднородностями, и, используя методы группирования, выбрать оптимальный вариант использования волокон кабеля. Кроме того, определяют функцию распределения неоднородностей по длине участка регенерации. Данные по распределению неоднородностей оформляют в виде графика и заносят в соответствующий паспорт. Паспорт участка регенерации должен иметь схему соеди-

нения волокон в каждой соединительной муфте, где производилось их группирование, измеренные значения уровней оптической мощности на оптических входах и выходах блоков линейных регенераторов, коэффициентов ошибок, а также затуханий в обоих направлениях передачи. При наличии в кабеле проводников для организации дистанционного питания измеряют их сопротивление и проверяют электрическую прочность изоляции между проводами и каждым проводом и землей.

Измерительную аппаратуру чаще всего размещают в специально приспособленных автомашинах, что позволяет ускорить процесс монтажа и строительства.

При приемосдаточных измерениях измеряют параметры, предусмотренные действующими правилами и руководствами по монтажу, настройке, паспортизации и приемке в эксплуатацию аппаратуры ВОСП. Для проведения приемосдаточных измерений на обоих концах участка регенерации необходимо иметь полные комплекты специализированной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

Измерения, выполняемые в процессе эксплуатации для определения технического состояния линейных сооружений и аппаратуры, предупреждения повреждений и их устранения, делятся на профилактические, аварийные и контрольные. Эти измерения проводят как с использованием специализированной КИА, так и аппаратурными методами с помощью специально встроенных в аппаратуру линейного тракта контрольно-измерительных устройств.

8.2. Измерение параметров и характеристик оптических кабелей

8.2.1. Измерение затухания

Измерение затухания осуществляют как на различных стадиях производства кабеля, так и при проведении строительно-монтажных работ и эксплуатации ВОСП. Как известно, измерение затухания в любой направляющей системе связано с определением уровня сигнала на ее входе и выходе. На первый взгляд простая задача определения уровня оптической мощности на входе кабеля вносит определенные трудности и в схему измерения, и в сам процесс измерений. Дело в том, что всегда имеется некоторая неопределенность этого уровня, так как он зависит от условий ввода излучения в волокно кабеля (качества обработки торца волокна, точности юстировки излучателя относительно этого торца и др.). Кроме того, определенную сложность представляет обеспечение на входе равновесного распределения мод, что необходимо для постоянства условий согласования источника излучения с волокном. Пути преодоления указанных трудностей объясняют разнообразие существующих в настоящее время методов измерения затухания. Кратко рассмотрим основные методы измерения затухания, получившие распространение на практике.

Принцип *прямого метода* измерения затухания основан на известном определении затухания в децибелах по формуле $a = 10 \lg(P_0/P_L)$, где P_0 — мощность излучения, введенного в кабель; P_L — мощность излучения на конце кабеля длиной L .

Величина затухания может быть вычислена также через уровни оптической мощности p_0 и p_L по формуле $a = p_0 - p_L$, где уровни p_0 и p_L обычно определяют и измеряют относительно 1 мВт оптической мощности.

Можно отметить три модификации данного метода: измерение затухания без разрушения волокна или кабеля, измерение затухания с разрушением (метод обрыва) и измерение вносимого затухания.

Схема для измерения затухания по данному методу показана на рис. 8.1. Генератор оптического сигнала должен обладать высокой стабильностью излучаемой мощности и обеспечивать регулируемый уровень выходного излучения, которое может быть промодулировано как гармоническим,

Рис. 8.1. Схема измерения затухания:

1 — генератор оптического сигнала; 2 — устройство ввода; 3 — смеситель мод; 4 — фильтр мод; 5 — оптический кабель или волокно; 6 — устройство вывода; 7 — измеритель оптической мощности (уровня)



так и цифровым сигналом. Смеситель мод, устанавливаемый при измерении затухания многомодовых кабелей, обеспечивает стабилизацию модового состава излучения (равновесное распределение мощности по модам) на начальном участке кабеля. В качестве смесителя мод можно использовать отрезок волокна, аналогично установленному в кабеле, зажатый между двумя шероховатыми поверхностями длиной в несколько сантиметров. Другим вариантом смесителя мод является отрезок волокна в несколько сотен метров, намотанного на цилиндр малого диаметра (менее 10 см).

При измерении затухания многомодового кабеля осуществляют вывод мод, распространяющихся по оболочке волокна, а при измерении затухания одномодового волокна помимо этого обеспечивают одномодовый режим возбуждения. Это достигается применением соответственно фильтра мод оболочки и фильтра мод сердцевины. В качестве фильтра мод сердцевины может быть использован начальный отрезок измеряемого волокна, сложенный петлей радиусом порядка 10 см. Фильтр мод оболочки включают после фильтра мод сердцевины. В качестве этого фильтра может быть использована кювета с иммерсионной жидкостью, смачивающей оптическую оболочку измеряемого волокна на длине 5...10 см. Повышение точности измерения достигается путем многократного измерения ρ_L . Для этого от выходного конца измеряемого волокна каждый раз отламывают короткий отрезок (0,5...3 см) и повторяют измерение.

Для измерения затухания кабеля при проведении строительно-монтажных работ обычно используют метод обрыва, при котором с соблюдением условий ввода и вывода излучения, а также соответствующей фильтрации мод и при необходимости их смещения производят обрыв волокна на расстоянии нескольких метров от входного конца. Этот обрыв выполняют после измерения ρ_L , а значение уровня, измеренное на коротком отрезке кабеля, полагают равным ρ_0 . Для измерения используют ту же схему рис. 8.1, причем с целью повышения точности измерения повторяют несколько раз путем дополнительных обрывов волокна длиной несколько сантиметров. Недостатком данного метода измерения является его разрушающий волоконно характер.

При эксплуатации, а также приемосдаточных измерениях линейных сооружений ВОСП применяют метод измерения вносимого затухания. Вносимым затуханием называют разность уровней мощности, воспринимаемой приемником излучения при его непосредственном подключении к источнику излучения, и мощности, поступающей на приемник при его включении на выходе измеряемого волокна, концы которого армированы оптическими соединителями. Таким образом, в отличие от собственного затухания волокна или кабеля a_0 во вносимое затухание входят дополнительные затухания на входе $a_{вх}$ и выходе $a_{вых}$ измеряемой линии, вносимые оптическими соединителями, т. е. $a_{вн} = a_0 + a_{вх} + a_{вых}$.

В основе метода обратного рассеяния лежит явление обратного рэлеевского рассеяния. Для реализации этого метода измеряемое волокно зондируют мощными оптическими импульсами, вводимыми через направленный ответвитель. Вследствие отражения от рассеянных и локальных неоднородностей, распределенных по всей длине волокна, возникает поток обратного рассеяния. Регистрация этого потока позволяет определить функцию затухания по длине с того же конца кабеля, что является важным достоинством метода. Одновременно фиксируют местоположения и характер неоднородностей.

Для реализации данного метода разработаны специальные приборы — оптические рефлектометры во временной области или просто рефлектометры.

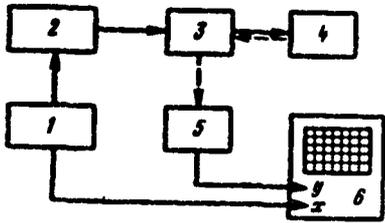


Рис. 8.2. Структурная схема рефлектометра:

1 — управляющее устройство; 2 — лазерный диод; 3 — направленный ответвитель; 4 — оптический соединитель; 5 — фотоприемник; 6 — электронный осциллограф

Они получают широкое распространение благодаря своей универсальности, так как обеспечивают одновременное определение целого ряда важнейших параметров: степени регулярности кабеля, мест неоднородностей и повреждений, потерь в местах соединений, затухания и др.

Упрощенная структурная схема рефлектометра приведена на рис. 8.2. Управляющее устройство обеспечивает согласованную работу лазерного диода и электронного осциллографа, создавая возможность наблюдения потока обратного рассеяния полностью или по частям. Для ввода оптических импульсов в волокно используются направленный ответвитель и оптический соединитель. Поток обратного рассеяния через оптический соединитель и направленный ответвитель поступает на высокочувствительный фотоприемник, где преобразуется в электрическое напряжение. Это напряжение подается на вход y электронного осциллографа, вызывая соответствующее мощности потока обратного рассеяния отклонение луча осциллографа по вертикальной оси экрана. Ось x осциллографа градуируется в единицах расстояния, а ось y — в децибелах.

Схема измерения затухания методом обратного рассеяния с помощью рефлектометра показана на рис. 8.3, а, а на рис. 8.3, б приведен пример графика распределения уровня мощности излучения обратного рассеяния (рефлектограмма), наблюдаемого на экране прибора или самописца. Наряду с плавным изменением уровня мощности обратного рассеяния на рефлектограмме имеются «скачки», обусловленные различными неоднородностями. Начальный выброс уровня обусловлен френелевским отражением в разъемном оптическом соединителе, соединяющем прибор с испытуемым кабелем. Точка сочленения строительных длин кабеля при отсутствии френелевского отражения вносит лишь затухание, величина которого соответствует падению уровня в этой точке. Конец кабеля или его обрыв дают выброс, обусловленный френелевским отражением. При повреждениях кабеля френелевское отражение может отсутствовать (скол волокна в наклонной к оси плоскости), и тогда место обрыва характеризуется резким падением уровня (штриховая линия на рис. 8.3, б).

По рефлектограмме можно определить величину затухания на длине $(L_2 - L_1)$ как $0,5(p_1 - p_2)$, а также среднее значение коэффициента затухания на этой длине: $\alpha_{L_1 - L_2} = p_1 - p_2 / [2(L_2 - L_1)]$.

Обычно с одной стороны кабеля рефлектометры позволяют измерять затухание в диапазоне 15...20 дБ, поэтому при превышении этого затухания измерения следует проводить с обеих сторон. На относительно коротких отрезках кабеля это позволяет повысить точность измерений.

Основным недостатком данного метода является небольшой динамический диапазон измерений, что обусловлено малой мощностью излучения

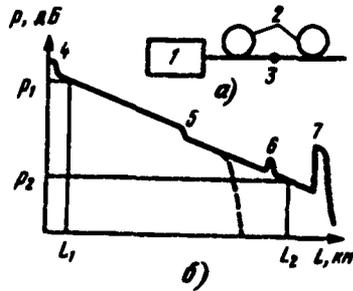


Рис. 8.3. Измерение затухания методом обратного рассеяния:

а — схема измерения; б — рефлектограмма:
1 — рефлектометр; 2 — отрезки кабеля строительной длины; 3 — место соединения строительных длин; 4 — точка соединения кабеля с прибором; 5 — точка соединения строительных длин; 6 — место неоднородности; 7 — конец кабеля

обратного рассеяния. Кроме того, рефлектометры являются высокосложными и дорогими приборами, не всегда доступными для проведения измерений.

8.2.2. Измерение полосы пропускания и дисперсии

Полоса пропускания, как и коэффициент затухания, относится к основным параметрам оптических кабелей. Она определяет информационно-пропускную способность кабеля и в зависимости от ее значения — область применения кабеля (городская, внутризональная, магистральная сеть).

Для измерения полосы пропускания можно использовать частотный или импульсный метод. При частотном методе полосу пропускания кабеля определяют по амплитудно-частотной модуляционной характеристике (АЧМХ). Схема измерения АЧМХ аналогична схеме, показанной на рис. 8.1. Для проведения измерений применяют генератор оптического сигнала с гармонической модуляцией интенсивности в полосе частот, превышающей ширину полосы пропускания кабеля. Аналогичное требование предъявляют к широкополосности оптоэлектронного преобразователя (фотоприемника) — измерителя оптической мощности или уровня. Длина волны и ширина спектра излучения, вводимого в кабель, должны соответствовать требованиям, установленным в ТУ на измеряемый кабель. В результате измерений получают зависимость уровня мощности на выходе кабеля от частоты модуляции f_m . Пример такой зависимости и определение по ней полосы пропускания ΔF_L кабеля длиной L показаны на рис. 8.4. Километрическую полосу пропускания, называемую также коэффициентом широкополосности, определяют по формуле $\Delta F = \Delta F_L L$, где γ — эмпирический коэффициент, установленный в ТУ на измеряемый кабель ($0,5 \leq \gamma \leq 1$).

При импульсном методе полосу пропускания определяют путем последовательной регистрации импульса оптического излучения на выходе измеряемого кабеля и импульса на выходе его короткого отрезка, образованного путем обрыва кабеля в начале. Форму последнего импульса принимают за форму импульса на входе кабеля. Далее, используя известные из теории линейных цепей соотношения, вычисляют амплитудные спектры импульсов и АЧМХ измеряемого кабеля, а по ней определяют полосу пропускания. Все вычисления выполняются обычно автоматически с помощью микроЭВМ, встроенной в состав измерительной аппаратуры.

Если импульсы на входе и выходе измеряемого кабеля имеют гауссовскую форму, то полосу пропускания определяют на основании измерения длительности импульсов. В этом случае ΔF_L , МГц, вычисляют по формуле

$$\Delta F_L = 440 / \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}$$

где $t_{\text{вых}}$, $t_{\text{вх}}$ — длительности, нс, соответственно выходного и входного импульсов по уровню 0,5

Величина $\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}$ определяет дисперсию кабеля, поэтому импульсный метод по сути является и методом измерения дисперсии.

Для одномодовых кабелей характерны дисперсия материала и волноводная дисперсия, которые обычно объединяют под общим названием хроматической дисперсии. Вклады материальной дисперсии и волноводной в общую хроматическую дисперсию отличаются по знаку и в определенной области волн могут иметь равные значения, что дает принципиальную возможность их компенсации. Область нулевой дисперсии одномодовых оптических кабелей на кварцевых волокнах лежит в диапазоне 1,3 мкм, а в кабелях со смещенной дисперсией — в диапазоне 1,55 мкм.

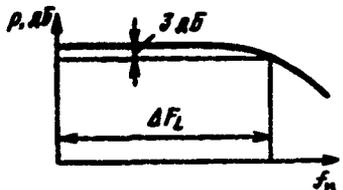


Рис. 8.4. Амплитудно-частотная модуляционная характеристика и определение полосы пропускания ОК

При этом удельная (на 1 км кабеля) хроматическая дисперсия не превышает 1..5 пс/(нм·км), что сильно затрудняет ее непосредственное измерение, так как требуются чрезвычайно быстродействующие устройства.

Для измерения хроматической дисперсии одномодовых кабелей в основном используются два метода, первый из которых связан с измерением во временной области (метод временной задержки), а второй — в частотной области (фазовый метод). Оба метода удовлетворяют требованиям точности и воспроизводимости результатов и одобрены МККТТ. Однако метод временной задержки является более сложным по сравнению с фазовым методом, и поэтому последний чаще используется на практике.

Фазовый метод основан на измерении фазового сдвига сигнала, модулированного по интенсивности излучения, зондирующего кабель длиной L на различных длинах волн. Частота модуляции интенсивности обычно фиксирована и лежит в пределах 30..100 МГц. Измерение зависимости фазового сдвига между сигналами на различных длинах волн позволяет найти зависимость временной задержки сигнала от длины волны $\tau(\lambda)$, а последующее ее дифференцирование — хроматическую дисперсию $\Delta\tau(\lambda) = L^{-1}d\tau(\lambda)/d\lambda = (2\pi f_m L)^{-1}d\phi(\lambda)/d\lambda$. Так как измерения $\tau(\lambda)$ проводят по точкам, то для получения плавной кривой используют аппроксимационную формулу Селлмайера $\tau(\lambda) = a + b\lambda^2 + c\lambda^3$ и метод наименьших квадратов для нахождения коэффициентов a , b и c . Обычно все вычисления и сам процесс измерения автоматизируют с помощью внешней персональной ЭВМ или встроенного в прибор микропроцессора. Точность данного метода при использовании светодиодов на InGaAsP, перестраиваемых в области спектра 1,2...1,6 мкм, при $f_m = 30$ МГц порядка 1 пс/(нм·км). Переход на лазерное излучение и более высокую частоту модуляции позволяет повысить точность измерения до долей пс/(км·нм).

8.2.3. Измерение длины волны отсечки

Работу кабеля в одномодовом режиме контролируют путем измерения длины волны отсечки $\lambda_{кр}$ в основном методами изгиба, передаваемой мощности и диаметра модового поля.

Метод изгиба основан на зависимости потерь при изгибе волокна от длины волны распространяющегося излучения. Измеряемое волокно возбуждается источником излучения с перестраиваемой длиной волны. Сначала измеряют зависимость выходной мощности P от λ при слабом изгибе волокна (радиус изгиба > 250 мм), а затем при тех же условиях ввода — вывода излучения измеряют эту зависимость при сильном изгибе $P_{изг}(\lambda)$ (радиус изгиба порядка 10 мм). Потери на изгибе в зависимости от длины волны определяют по формуле

$$a_{изг}(\lambda) = 10 \lg(P(\lambda)/P_{изг}(\lambda)).$$

Функция $a_{изг}(\lambda)$ имеет максимум, когда LP_{11} -мода становится критической и резко уменьшается на более длинных волнах. Длина волны отсечки определяется по графику $a_{изг}(\lambda)$ как самая короткая длина волны, при которой потери на изгиб составляют 0,1 дБ.

Метод передаваемой мощности основан на зависимости мощности излучения от длины волны. Передаваемая мощность излучения $P(\lambda)$ от перестраиваемого по длине волны источника нормируется относительно мощности $P_{н}(\lambda)$, передаваемой опорным многомодовым волокном при том же источнике и устройстве ввода излучения. Пример графика нормированной передаваемой мощности, выраженной в децибелах, в зависимости от λ и определение $\lambda_{кр}$ показаны на рис. 85, а. Длина испытываемого волокна выбирается порядка 2 м, а само волокно навивается на бобину с радиусом изгиба не менее 140 мм. Опорное многомодовое волокно имеет длину 1..2 м. Устройство ввода излучения должно обеспечивать возбуждение LP_{01} - и LP_{11} -мод. После устройства ввода устанавливается фильтр мод оболочки.

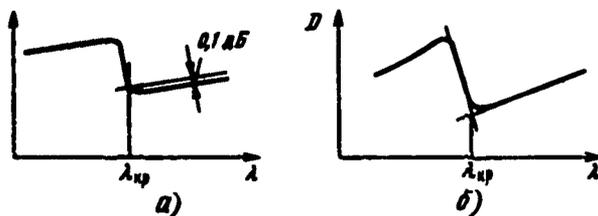


Рис. 8.5. Определение длины волны отсечки методами: *а* — передаваемой мощности; *б* — диаметра модового поля

В методе диаметра модового поля используется явление изменения диаметра поля излучения в волокне в зависимости от длины волны. Измерение заключается в определении на выходе волокна диаметра поля D на различных длинах волн и нахождении по кривой $D(\lambda)$ длины отсечки (рис. 8.5, б). Этот метод измерения длины волны отсечки более сложен, чем два предыдущих.

8.2.4. Измерение профиля показателя преломления

Профиль показателя преломления является основным конструктивным параметром, определяющим широкополосность оптических волокон и кабелей. При точном выдерживании оптимального профиля показателя преломления градиентного волокна вдоль его длины полоса пропускания может достигать 10 ГГц·км. Ясно, что для реализации такой полосы необходимы точные методы измерения профиля показателя преломления. Для измерения профиля показателя преломления могут использоваться различные методы: интерферометрические, лучевые и рассеяния, сканирования отражения от торца, пространственного распределения излучения (в ближней и дальней зонах) и др.

Благодаря простоте реализации в настоящее время широко применяется метод пространственного распределения излучения в ближней зоне (метод ближнего поля). Сущность данного метода основана на том, что при равномерном возбуждении всех направляемых мод мощность в любой точке сечения волокна пропорциональна разности показателей преломления в данной точке и оболочке, т. е. пропорциональна квадрату локальной числовой апертуры. Для равномерного возбуждения всех мод необходим источник, диаграмма направленности излучения которого подчиняется закону Ламберта. Такой диаграммой направленности обладают светоизмерительные лампы накаливания и светодиоды с поверхностным излучением. Равномерно возбуждая волокно на входном торце, методом сканирования измеряют мощность в различных точках сечения выходного торца и вычисляют профиль показателя преломления по формулам:

$$n_1(r) = \left[(NA)^2 \frac{P(r)}{P(0)} + n_2^2(a) \right]^{1/2}$$

для образцов волокна длиной порядка 2 м и

$$n_1(r) = \left[(NA)^2 \frac{P(r)}{P(0)} \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right)^{1/2} + n_2^2(a) \right]^{1/2}$$

для коротких отрезков (0,1 м).

Здесь $P(0)$ и $P(r)$ — мощности, измеренные соответственно в центре сердцевины и в точке r . К недостаткам данного метода относится отсутствие информации об абсолютном значении показателя преломления, а также

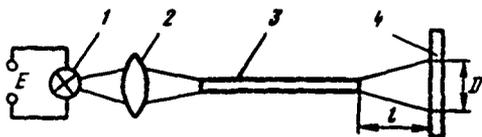


Рис 86 Схема для измерения апертуры оптического волокна

1 — источник света, 2 — объектив, 3 — волокно, 4 — экран

необходимость предварительного нахождения числовой апертуры и корректировки полученных результатов с учетом мод утечки (вытекающих мод).

Наиболее точными являются интерферометрические методы измерения. Эти методы основаны на исследовании интерференционных изображений с заготовки или оптического волокна, получаемых с помощью интерференционного микроскопа, например, на основе интерферометра Маха—Цандера. При исследовании волокна с последнего делают тонкий срез длиной l с полированными плоскопараллельными поверхностями. Подготовленный образец устанавливают в интерференционный микроскоп и полученные интерференционные картины фотографируют. Измеряя значения шагов между интерференционными полосами в сердцевине h_1 и оболочке h_2 , находят разность между показателями преломления на волне источника излучения $\Delta n(\lambda) = (\lambda/l)(h_1/h_2)$. Погрешность интерферометрических методов не хуже $10^{-4} \cdot 10^{-6}$.

3.2.5. Измерение числовой апертуры

Знание числовой апертуры необходимо как для уменьшения потерь в устройствах ввода—вывода излучения, так и потерь, происходящих на сочленения волокон. Несогласованность соединяемых волокон по числовой апертуре может привести к существенным потерям.

Для измерения числовой апертуры обычно определяют апертурный угол. Апертурный угол волокна, находящегося в равновесном возбуждении мод, измеряют, как правило, путем наблюдения распределения выходящей мощности в дальней зоне (рис 86). Для этого на расстоянии $l = 10 \dots 20$ мм от выходного торца устанавливают отражающий экран с градуированной шкалой. Поверхность торца волокна предварительно обрабатывают так, чтобы она была гладкой и строго перпендикулярной оси волокна. Если видимый на экране диаметр светового пятна при возбуждении волокна измерительной лампой накаливания обозначить D , то апертурный угол $\theta_a = \arctg(D/2)$.

При необходимости измерения апертуры в спектре невидимого излучения ($\lambda > 0,78$ мкм) для определения диаметра D используют сканируемый по дуге на расстоянии l точечный фотоприемник, осуществляя таким образом регистрацию распределения выходящей мощности в дальней зоне. В качестве приемника излучения можно использовать телевизионную камеру; при этом отпадает необходимость в сканировании.

3.2.6. Измерение диаметра модового поля одномодовых кабелей

Диаметр модового поля основной моды $LP_{01}(HE_{11})$ является важным параметром одномодовых волокон и кабелей, так как может использоваться не только для определения ширины диаграммы направленности, но и для расчета потерь на соединениях и микроизгибах. Существует несколько методов измерения диаметра модового поля: ближнего поля, поперечного смещения и др.

Метод ближнего поля обеспечивает прямое измерение диаметра модового поля. Для этого на выходном торце волокна с помощью хорошо сфокусированного микроскопа измеряют распределение мощности излучения по торцу.

Метод поперечного смещения основывается на измерении мощности излучения, выходящего из двух последовательно соединенных одномодовых волокон при их взаимном радиальном смещении в месте соединения. Размер модового пятна при гауссовской аппроксимации распределения поля определяют на уровне $1/e^2$ функции передачи мощности в зависимости от смещения. Максимум передаваемой мощности будет при точном совмещении осей соединяемых волокон. Этот метод несложен в реализации и обеспечивает точность не хуже, чем другие методы измерения. С другой стороны, метод ближнего поля позволяет дополнительно определить диаметр и некруглость оболочки, а также неконцентричность сердцевин и оболочки волокна.

8.2.7. Измерение переходного затухания

Переходное затухание в оптическом кабеле очень велико, поэтому его измерение представляет значительную сложность. Для измерения переходного затухания используют хорошо известный метод сравнения относительного уровня мощности оптического излучения на выходном (входном) конце волокна кабеля, подверженного влиянию, с уровнем мощности, введенной во влияющее волокно. При измерении уровня мощности на выходном (дальнем) конце волокна, подверженного влиянию, определяют переходное затухание на дальнем конце. При измерении уровня мощности на входном конце волокна определяют переходное затухание на ближнем конце. При этом влияющее волокно и волокно, подверженное влиянию, должны быть выбраны из рядом расположенных, если в ТУ на конкретный кабель не указаны другие волокна. Для измерения переходного затухания необходимо располагать приборами, позволяющими измерять очень низкие уровни оптической мощности (ниже -90 дБ). Поэтому при отсутствии возможности регистрации переходного влияния отмечают реальный динамический диапазон, реализуемый при измерениях $d_p = p_1 - p_0$, где p_1 — уровень мощности оптического излучения на входе влияющего волокна; p_0 — минимально измеряемый прибором уровень.

8.2.8. Измерение геометрических и механических характеристик ОК

Измерение поперечных геометрических параметров волокна может быть произведено различными методами, подробно рассматриваемыми в специальной литературе. Здесь же отметим, что это измерение тесно связано с измерением профиля показателя преломления. Поэтому для определения диаметра сердцевин и оболочки волокна, а также других геометрических параметров достаточно знать распределение показателя преломления по сечению волокна с требуемым разрешением. Определение конструктивных размеров кабеля и модулей, а также отклонение сечения от круглого может производиться обычными визуальными методами, в частности с помощью микроскопа с измерительной сеткой.

Механические характеристики оптических кабелей играют важную роль для надежного функционирования как самих кабелей, так и систем передачи. При исследовании механических характеристик кабелей критериями их годности считается отсутствие разрушений (обрывов) оптических волокон кабеля, необратимых изменений свойств конструкции кабеля и отклонений какого-либо параметра (чаще всего затухания) от номинального значения. Испытываемый образец кабеля считается выдержавшим испытание, если он соответствует всем трем критериям.

Испытания кабелей плотной структуры на допустимое растягивающее усилие проводят на обычной разрывной машине. Для кабелей со свободной укладкой волокон эти испытания проводят на специально разработанной разрывной машине, которая обеспечивает растяжение, максимально приближенное к условиям прокладки. Испытания кабелей на стойкость к длительным изгибам проводят путем его намотки на цилиндрический шаблон соот-

ветствующего размера и измерений в соответствии с методикой ускоренных испытаний. Испытания на кратковременные изгибы выполняют на специально разработанных установках для многократных изгибов. Если целью испытания является определение стойкости при заданном числе изгибов и величине изгиба, то после осуществления этого числа изгибов испытуемый образец снимают с установки и исследуют на соответствие критериям годности. Если целью испытания является определение допустимого числа изгибов, то образец изгибают до наступления отказа — изменения затухания, обрыва одного из волокон, повреждения элементов конструкции кабеля.

Испытание кабеля на допустимое поперечное сжатие (раздавливающее усилие) обычно выполняют путем размещения кабеля между двумя плоскими металлическими пластинами, к которым прикладывают сжимающие силы. Для испытаний на стойкость к ударным воздействиям наиболее часто применяют метод падающего шара. При этом проверка на соответствие критериям годности может выполняться после каждого испытания, что исключает необходимость непрерывного контроля, несколько усложняющего процедуру данных испытаний.

8.2.9. Определение места и характера повреждения ОК

Характерные повреждения ОК — нарушение целостности волокна и защитной оболочки. Методы определения места и характера повреждения оболочки аналогичны методам, широко применяемым в электрических кабелях с медными проводниками. Повреждения оптического волокна являются специфичными. Повреждением волокна считается любая неоднородность, приводящая к ухудшению передаточных свойств кабеля.

Один из наиболее характерных видов повреждения — обрыв волокна. Существуют два основных метода определения места обрыва оптического волокна: измерение интенсивности обратного рассеяния с помощью рефлектометра и импульсный локационный метод определения места обрыва.

Сравнивая эффективность этих методов, следует отметить, что недостатком первого метода является низкий уровень потока обратного рассеяния, что не позволяет использовать его для определения места обрыва кабельных линий большой протяженности.

Импульсный метод обладает высокой разрешающей способностью и позволяет определить как места неоднородностей, так и полного обрыва оптических волокон в кабеле.

Принцип измерения расстояния до места обрыва данным методом состоит в том, что в кабель посылают серию зондирующих импульсов и по длительности возвращения отраженных от места обрыва или повреждения волокна импульсов определяют расстояния до этого места (рис. 8.7):

$$l = tc / (2n_1 \pm \Delta t c / 2n_1),$$

где t — время задержки отраженного импульса; Δt — уширение отраженного импульса за счет дисперсии; c — скорость света; n_1 — показатель преломления сердцевины ОВ. Данный метод позволяет определить место повреждения кабеля с точностью до нескольких метров.

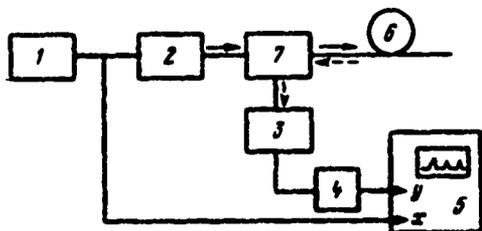


Рис. 8.7. Схема измерения расстояния до места обрыва импульсным методом:

1 — генератор зондирующих импульсов; 2 — лазерный диод; 3 — фотоприемник; 4 — блок обработки и накопления; 5 — специализированный осциллограф; 6 — измеряемое волокно; 7 — направленный ответвитель

Следует отметить, что импульсный метод контроля состояния ОК аналогичен импульсным методам испытания коаксиальных кабелей. Однако свой отпечаток накладывает специфика оптических волокон, в которых отраженная мощность зависит от угла слома волокон. В случае воздействия на волокно только растягивающей силы возникает плоская поверхность излома, если же волокно разрушается от удара, то поверхность не является плоской. Поскольку значение эхо-импульса зависит от характера излома волокна, в ряде случаев импульсный метод может оказаться недостаточно точным для обнаружения места повреждения ОК.

Метод обратного рассеяния описан в § 8.2.1. На графике рис. 8.3, б видны отражения передаваемого сигнала на различных участках линии, а также зафиксированы точки, характеризующие места повреждений кабеля (обрыв, неоднородности). Так как на графике по горизонтальной оси отложена длина пути распространяющегося отражения, то можно определить место этого повреждения.

В оптических кабелях наряду с повреждением волокон может быть также повреждение наружной пластмассовой оболочки, приводящее к проникновению в кабель влаги и ухудшения характеристик кабеля.

Место пониженного сопротивления изоляции наружной оболочки ОК определяется комплектом приборов типа ИМПИ (измеритель места повреждения изоляции). Методика нахождения повреждений и приборы те же, что и для электрических кабелей.

8.3. Измерение характеристик волоконно-оптических трактов и аппаратуры ВОСП

8.3.1. Измерение коэффициента ошибок

Коэффициент ошибок является важнейшей характеристикой как отдельных участков регенерации, так и тракта в целом и определяется отношением числа ошибочно принятых символов $N_{\text{ош}}$ цифрового сигнала к общему числу символов N , переданных за интервал измерения $k_{\text{ош}} = N_{\text{ош}}/N$. Измерение коэффициента ошибок носит статистический характер, так как результат измерения $k_{\text{ош}}$, получаемый за конечное время, является случайной величиной. Относительную погрешность измерения в случае гауссовского закона распределения числа ошибок ($N_{\text{ош}} \geq 10$) рассчитывают по формуле

$$\alpha = (t_{\beta} / \sqrt{N_{\text{ош}}}).$$

где t_{β} — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности β результата измерений ($t_{\beta} = \Phi^{-1}[(1 + \beta)/2]$), где $\Phi^{-1}(x)$ — обратная функция

$$\text{интеграла вероятностей } \Phi(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt.$$

Значение $k_{\text{ош}}$ позволяет оценить вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$, определяющей количественную меру помехоустойчивости. Область возможных значений оценки, в которой с заданной доверительной вероятностью β будет находиться значение $p_{\text{ош}}$, определяется верхней $p_{\text{в}}$ и нижней $p_{\text{н}}$ доверительными границами. При гауссовском законе распределения числа ошибок значения $p_{\text{в}}$ и $p_{\text{н}}$ определяют по формулам

$$p_{\text{в}} = k_{\text{ош}} + t_{\beta} \sqrt{k_{\text{ош}}(1 - k_{\text{ош}})/N},$$

$$p_{\text{н}} = k_{\text{ош}} - t_{\beta} \sqrt{k_{\text{ош}}(1 - k_{\text{ош}})/N}.$$

Очевидно, что точность измерения вероятности ошибки и ее оценки (коэффициента ошибок) растет с увеличением N . Общее число символов цифрового

сигнала, переданных за интервал измерения $T_{\text{изм}}$, зависит от скорости передачи V : $N = T_{\text{изм}} V$. Поэтому чем больше скорость передачи, тем быстрее можно выполнить измерение $k_{\text{ош}}$.

Достоверное измерение значения коэффициента ошибок, позволяющее по вышеприведенным формулам определить погрешность измерения $k_{\text{ош}}$ и доверительные границы вероятности ошибки, может быть достигнуто только в том случае, если обеспечивается выделение и фиксация всех без исключения ошибок. Этого можно достигнуть путем посимвольного сравнения принимаемой и исходной цифровой последовательностей. Такой способ выделения ошибок используется при организации измерений «по шлейфу». В этом случае коэффициент ошибок тракта измеряют с одной оконечной станции, а на противоположном конце тракта устанавливают шлейф. Другой метод выделения ошибок основан на свойствах используемых для передачи в линии кодов, обуславливающих за счет введения избыточности возможности обнаружения ошибок. В этом случае коэффициент ошибок может быть измерен «по направлению», когда выделение и фиксацию числа ошибочных символов производят на приемном конце тракта (участка регенерации).

Для измерения коэффициента ошибок разработаны специальные приборы — измерители коэффициентов ошибок (ИКО), содержащие генераторное оборудование, которое формирует псевдослучайные или регулярные последовательности кодовых символов как в коде в линии, так и в стыковом коде, а также приемное оборудование, осуществляющее собственно измерение $k_{\text{ош}}$. Измерение коэффициента ошибок одного направления (по направлению) требует двух идентичных приборов (или двух блоков — генераторного и приемного), размещаемых на противоположных концах тракта или регенерационного участка. При проведении измерений с одной станции на противоположной устанавливают шлейф, а измеренное значение $k_{\text{ош}}$ соответствует прохождению цифрового сигнала в обоих направлениях передачи.

8.3.2. Измерение энергетического потенциала и чувствительности фотоприемного устройства

Величина энергетического потенциала определяется как разность между измеренными уровнями средней мощности цифрового оптического сигнала на выходе передающего оптоэлектронного модуля и входе приемного оптоэлектронного модуля, соединенных между собой оптическим кабелем, при таком вносимом затухании, которое соответствует заданному значению коэффициента ошибок. Для измерения энергетического потенциала необходимо иметь линию с регулируемым затуханием. В качестве такой линии можно использовать оптический аттенюатор, включенный между станционным и линейным кабелями при измерении по направлению передачи от одной станции к другой или между передающим и приемным оптоэлектронными модулями одной станции при измерении по шлейфу. В первом случае измерение уровней проводят на обоих концах участка регенерации, во втором — только на одном конце. При проведении измерений осуществляют контроль коэффициента ошибок. Если используется калиброванный аттенюатор, то при измерениях по шлейфу отпадает необходимость в измерениях уровней оптической мощности на выходе передающего и входе приемного оптоэлектронных модулей, так как величина энергетического потенциала в этом случае определяется величиной затухания аттенюатора, при которой обеспечивается заданный коэффициент ошибок.

Аналогично измеряют чувствительность фотоприемного устройства, которую определяют как минимальный уровень средней мощности цифрового оптического сигнала на входе приемного оптоэлектронного модуля, обеспечивающий заданное значение коэффициента ошибок. С помощью оптического аттенюатора на входе приемного оптоэлектронного модуля устанавливается такой уровень оптической мощности, при котором контролируемый коэффициент ошибок становится равным заданному (как правило, 10^{-9}). После

этого измеряют установленный на входе приемного оптоэлектронного модуля уровень оптической мощности, соответствующий чувствительности фотоприемного устройства линейного регенератора.

8.3.3. Измерение уровней оптической мощности

Измерение уровней оптической мощности является одной из наиболее частых измерительных операций, выполняемых в процессе производства, строительства и эксплуатации как компонентов ВОСП, так и системы в целом. Под уровнем оптической мощности понимается следующая величина:

$$p = 10 \lg(P/P_s),$$

где P — мощность измеряемого оптического излучения, P_s — эталонная мощность оптического излучения, равная 1 мВт.

Для измерения уровня оптической мощности используют ваттметры поглощаемой оптической мощности, проградуированные в децибелах. Измерение уровня оптической мощности по сути дела сводится к измерению мощности излучения. Для этого в измерительных приборах оптическое излучение с помощью измерительного фотоприемника (метрологически аттестованного первичного преобразователя оптического излучения в электрический ток или напряжение) преобразуется в электрический сигнал, который усиливается и индицируется. В качестве измерительного фотоприемника широко применяют специально отобранные и метрологически аттестованные фотодиоды, а также ФЭУ и др. При измерениях мощности важно следить за тем, чтобы все поперечное сечение измеряемого потока излучения попадало на рабочую площадку фотоприемника.

8.4. Состав измерений и испытаний

Состав измерений и испытаний оптических волокон и кабелей на этапе производства приведен в табл. 8.1—8.2, а на этапе строительства и эксплуатации — в табл. 8.3, состав измерений характеристик линейных трактов цифровых ВОСП приведен в табл. 8.4.

Таблица 8.1

Измеряемый параметр	Оптическое волокно	Оптический кабель
Коэффициент затухания	+	+
Километрическая полоса пропускания, дисперсия	+	+
Длина волны отсечки*	+	+
Числовая апертура	+	+
Профиль показателя преломления	+	+
Диаметр модового поля*	+	+
Переходное затухание	—	+
Длина ОК или расстояние до места повреждения	+	+
Диаметр:		
сердцевины волокна	+	+
оболочки волокна	+	+
защитного покрытия	+	+
кабеля	—	+
Отклонение от номинала диаметра:		
сердцевины волокна	+	+
волокна и защитного покрытия	+	—
Некруглость	+	—
Допустимое растягивающее усилие	+	+
Допустимое раздавливающее усилие	—	+
Допустимый радиус изгиба	+	+
Допустимое число закручиваний	—	+

* Измеряется для одномодовых волокон и кабелей.

Таблица 8.2

Вид испытания	Оптическое волокно	Оптический кабель
Повышенная температура:		
положительная	++	+
отрицательная	++	+
Стойкость к ударам и вибрациям	++	+
Стойкость к циклическим изменениям температуры	+	+
Радиационная стойкость	++	+
Влагостойкость	++	+
Пониженное и повышенное атмосферное давление	—	+
Стойкость к воздействию плесневых грибов, росы, дождя, соляного тумана, инея, солнечного излучения	—	+
Стойкость к повреждению грызунами	—	+
Испытания на надежность	+	+

Таблица 8.3

Измеряемый параметр	Этап строительства	Этап эксплуатации
Коэффициент затухания	+	—
Затухание:		
строительных длин	+	—
оптических сростков	+	—
участка регенерации	+	+
Расстояние до места повреждения	+	+
Герметичность	+	+

Таблица 8.4

Измеряемый параметр	Этап строительства	Этап эксплуатации
Коэффициент ошибок:		
одиночного участка регенерации	+	+
линейного тракта	++	++
Затухание участка регенерации	+	+
Энергетический потенциал	+	—
Чувствительность фотоприемного устройства регенератора	+	+
Уровни оптической мощности:		
на выходе линейного регенератора	+	+
на входе линейного регенератора	+	+

Результаты измерений и испытаний, проводимых на этапах производства, строительства и эксплуатации оптических кабелей и линейных трактов ВОСП, проверяют на соответствие нормам параметров и характеристик, указанных в ГОСТах и ТУ.

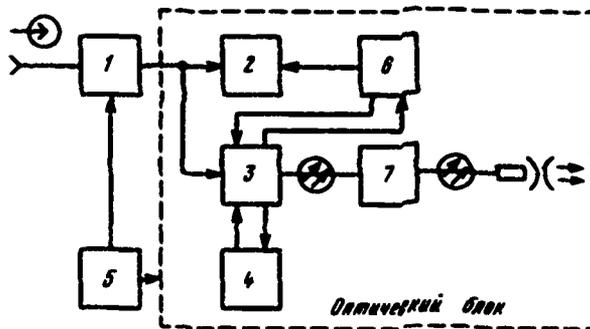
8.5. Измерительные приборы

Генераторы оптических сигналов ОГ4-162 и ОГ4-163. Эти генераторы предназначены для генерирования оптических сигналов с гармонической модуляцией интенсивности излучения и измерения амплитудно-частотных модуляционных характеристик оптических компонентов ВОСП и оптических кабелей с диаметром волокна 50/125 мкм. Генератор ОГ4-162 рассчитан на работу в диапазоне 0,85 мкм, а ОГ4-163 — в диапазоне 1,3 мкм.

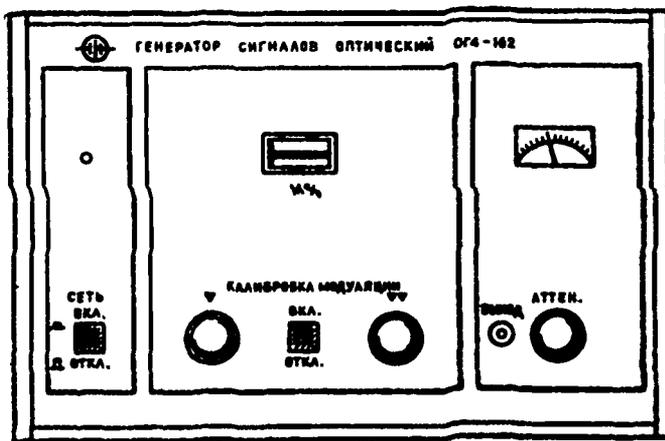
Принцип действия генераторов основан на преобразовании светодионом электрического сигнала в оптический. Светодиод термостатирован и охвачен обратной связью для стабилизации выходной мощности. Нестабильность уровня выходной оптической мощности менее 10%. На светодиод подается постоянное смещение и переменный модулирующий сигнал от внешнего генератора через усилитель мощности. Диапазон частот огибающей модулированного гармонического сигнала $20 \dots 1 \cdot 10^7$ Гц при сигнале от внешнего генератора не более 3 В. Глубина модуляции устанавливается регулятором входного сигнала. Коэффициент модуляции обеспечивается в пределах $0 \dots 0,85$ на частотах $10^2 \dots 10^6$ Гц и в пределах $0 \dots 0,7$ на частотах $10^6 \dots 10^7$ Гц. Мощность излучения на выходном оптическом полюсе генератора не менее 10^{-5} Вт при $\lambda = 0,85$ мкм и $2 \cdot 10^{-6}$ Вт при $\lambda = 1,3$ мкм. Предел плавного регулирования выходной мощности излучения не менее 20 дБ. Ослабление мощности излучения выносным оптическим аттенуатором ступенчатое (20 ± 5 дБ) и осуществляется при его включении между соединителями, входящими в комплект поставки. Предел допускаемого значения погрешности установки ослабления мощности не более 20%, а предел допускаемого значения погрешности установки коэффициента модуляции не более 15% в диапазоне изменения $0,1 \dots 0,85$ на частотах от 100 Гц до 1 МГц. Коэффициент гармоник огибающей модулированного оптического сигнала при коэффициенте модуляции 0,3 для частот от 100 Гц до 20 кГц не более 2%, а для частот выше 20 кГц не более 5%.

Питание приборов осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В, частотой $50 \pm 0,5$ Гц и содержанием гармоник до 5%. Нормальные условия эксплуатации: температура окружающей среды $20 \pm 5^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха $65 \pm 15\%$ при 20°C , атмосферное давление 100 ± 4 кПа.

Структурная схема и лицевая панель прибора ОГ4-162 даны на рис. 8.8. Работа прибора происходит следующим образом. Модулирующий сигнал от внешнего генератора подается на вход усилителя мощности. С выхода усилителя мощности усиленный электрический сигнал поступает в оптический блок, на излучатель и схему калибровки модуляции. Коэффициент модуляции индицируется стрелочным прибором, установленным на передней панели, а калибровка (грубая и точная) осуществляется переменными резисторами, регуляторы которых выведены на переднюю панель прибора. Излучатель установлен на микролодильнике, подключенном к схеме стабилизации температуры. В излучателе имеется фотодиод, на который поступает часть излучения светодиода. Сигнал с фотодиода подается в схему стабилизации мощности, регулирующей ток накачки светодиода для стабилизации излучаемой мощности. Оптический сигнал с выхода излучателя через оптическое волокно поступает в аттенуатор с регулируемым плавным ослаблением сигнала. Из аттенуатора по отрезку оптического волокна сигнал поступает на выходной оптический разъем (розеточная часть соединителя). Блок питания обеспечивает получение ряда стабилизированных напряжений постоянного тока, используемых в схеме прибора.



а)



б)

Рис.8.8. Измерительный генератор оптических сигналов ОГ4-162:

а — структурная схема; б — лицевая панель
 1 — усилитель мощности; 2 — схема калибровки модуляции; 3 — излучатель; 4 — схема стабилизации температуры; 5 — блок питания; 6 — схема стабилизации мощности; 7 — аттенюатор

Генераторы оптических сигналов ОГ4-181 и ОГ4-182. Генераторы предназначены для генерирования оптических сигналов с гармонической модуляцией и немодулированных сигналов, измерения затухания и амплитудно-частотных модуляционных характеристик волоконно-оптических элементов. Встроенный ваттметр индицирует среднее значение мощности на выходном оптическом разьеме генератора или на выходе подключенного к нему волокна. Генераторы используют для настройки, регулировки и испытаний волоконно-оптических устройств, работающих в режиме ручного управления в автоматизированном режиме через КОП (канал общего пользования).

Принцип действия приборов основан на преобразовании электрического сигнала в оптический лазерным диодом в генераторе и светодионом в преобразователе СД-0,85. Лазерный диод термостатирован и охвачен обратной связью для стабилизации выходной мощности излучения. Стабилизация мощности выходного излучения электрооптического преобразователя СД-0,85 осуществляется путем стабилизации его тока накачки. Модуляция выходного излучения производится путем модуляции тока накачки излучателя.

Генератор ОГ4-181 работает на длине волны оптической несущей $0,85 \begin{smallmatrix} +0,04 \\ -0,02 \end{smallmatrix}$ мкм, выходная мощность излучения не менее $8 \cdot 10^{-4}$ Вт, коэффициент нелинейных искажений 2%. Длина волны оптической несущей генератора ОГ4-182 составляет $1,3 \begin{smallmatrix} +0,05 \\ -0,02 \end{smallmatrix}$ мкм, выходная мощность излучения не менее $5 \cdot 10^{-4}$ Вт. Приборы обеспечивают установку коэффициента модуляции в пределах 0...0,6 и регулировку выходной мощности в пределах 0...70 дБ, нестабильность уровня выходной мощности не более 1%, диапазон частот огибающей модулированного синусоидального сигнала $50 \dots 10^8$ Гц для ОГ4-181 и $10^6 \dots 10^8$ Гц для ОГ4-182. Питание приборов осуществляется от сети переменного тока номинальным напряжением 220 В, потребляемая мощность 65 В·А, габаритные размеры $120 \times 308 \times 360$ мм, масса 10 кг.

В комплект каждого прибора входят: собственно генератор, построенный на лазерном диоде; оптоэлектронный преобразователь ФП-0,85 (ФП-1,3); электрооптический преобразователь СД-0,85; выносной attenuator на 10 дБ и ответвитель 1:1. Каждый генератор содержит: оптический блок, предназначенный для генерации и управления величиной мощности; блок обработки, обеспечивающий накачку лазерного диода, измерение параметров лазерного излучения и управление им; блок процессора, обеспечивающий взаимодействие функциональных узлов прибора и возможность работы с КОП. Применение встроенного измерителя мощности и микропроцессора расширяет функциональные возможности генераторов и повышает производительность измерительных операций, а наличие интерфейса КОП позволяет использовать приборы в автоматизированных системах с управлением от ПЭВМ.

Комбинированный генератор оптических и электрических импульсов ОГ5-87. Генератор предназначен для генерирования кодовых последовательностей оптических и электрических импульсов и обеспечения измерений параметров цифровых ВОСП. Возможна генерация как регулярных кодовых последовательностей с периодом 15 или 16 бит, так и псевдослучайных кодовых последовательностей с периодом повторения $2^{15}-1$ или $2^{23}-1$ бит. Кодовые последовательности оптических и электрических импульсов генерируются в кодах с возвращением к нулю (RZ), бифазном или бимпульсном (BIF) и знакопеременном или с обращением (СМ1).

Генератор выпускается в трех модификациях: ОГ5-87 для длин волн оптического излучения 0,85 и 1,3 мкм (генератор оптических и электрических импульсов комбинированный) и ОГ5-87А для длины волны 0,85 мкм и ОГ5-87Б для длины волны 1,3 мкм.

Тактовая частота при внутреннем запуске дискретно регулируется от 0,01 до 50 МГц. Устанавливаемые значения частоты в мегагерцах соответствуют ряду целых чисел от 10 до 99 с множителем 10^{-n} , где n может принимать значения 0, 1, 2 и 3. Предел допускаемого значения погрешности установки тактовой частоты в режиме внутреннего запуска не более 10%. Прибор обеспечивает установку трех фиксированных значений тактовой частоты, соответствующих тактовым частотам первичной, вторичной и третичной ЦСП: 2,048; 8,448 и 34,368 МГц. Предел допускаемого значения погрешности установки фиксированных тактовых частот не более $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ Ф.

Средняя мощность излучения P на выходном оптическом полюсе прибора в бифазном и СМ1-кодах равна 0,1...1,0 мВт. Предел допускаемого значения погрешности установки средней мощности не более 20%; предусмотрена возможность уменьшения мощности излучения до $P/2$, $P/4$ и $P/8$ (погрешность установки этих мощностей не нормируется). Время нарастания и время спада импульса излучения не более 5 нс. Глубина модуляции импульсного излучения не менее 70%. Нестабильность оптических импульсов за 8 ч работы не более 10%. Амплитуда электрических импульсов на внешней нагрузке 50 ± 1 Ом устанавливается равной 3 В (режим ТТЛ) или 1 В относительно постоянного смещения — $1,7 \pm 0,1$ В (режим ЭСЛ).

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой 50 Гц. Нормальные условия эксплуатации: тем-

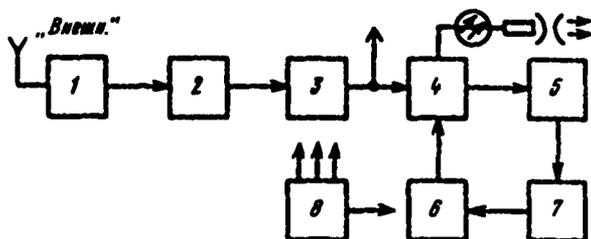


Рис. 8.9. Структурная схема генератора ОQ-587:

1 — формирователь тактового запуска; 2 — формирователь кодовых последовательностей; 3 — кодирующее устройство, 4 — электронно-оптический преобразователь, 5 — фотоусилитель, 6 — источник опорных напряжений; 7 — устройство автоматического слежения, 8 — источник питания

температура окружающей среды $10 \dots 35^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха до 80% при 25°C .

Структурная схема прибора дана на рис. 8.9. Формирователь тактового запуска генератора вырабатывает периодическую последовательность тактовых электрических импульсов со скважностью 2, которая формирователем кодовых последовательностей преобразуется в регулярные последовательности длиной 15 или 16 бит либо в псевдослучайные последовательности длиной $2^{15}-1$ или $2^{23}-1$ бит; кодовые последовательности при этом формируются в потенциальном коде.

В кодирующем устройстве осуществляется преобразование кодовых последовательностей в потенциальном коде в кодовые последовательности в RZ-, ВIF- и СMI-кодах. Электрический сигнал, сформированный кодирующим устройством, подается на электрический выход прибора и на электронно-оптический преобразователь. Сигнал, подаваемый на электрический выход прибора, может иметь уровни напряжений ЭСЛ и ТТЛ. В электронно-оптическом преобразователе осуществляется модуляция интенсивности излучения лазерных диодов работающих на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм. Модулированный оптический сигнал подается на оптический выход прибора. Для поддержания постоянного уровня оптического сигнала прибор содержит систему стабилизации мощности излучения, которая состоит из фотоусилителя, устройства автоматического слежения и источника опорных напряжений. С этой целью часть выходного излучения лазерного диода через оптический разветвитель подается на фотодиод, фототок которого усиливается фотоусилителем. Устройство автоматического слежения проводит сравнение уровней электрических импульсов на выходе фотоусилителя с постоянными напряжениями, задающими требуемый уровень оптической мощности, и выдает напряжения, в соответствии с которыми источник опорных напряжений задает ток модуляции и ток смещения лазерных диодов. Для обеспечения всех устройств энергией служит источник питания, выдающий ряд стабилизированных напряжений постоянного тока.

Оптические ваттметры поглощаемой мощности ОМ3-65 и ОМ3-66. Ваттметры предназначены для измерения средней мощности непрерывного оптического излучения и могут использоваться для измерения потерь в компонентах ВОСП, а также при их настройке, регулировке и испытаниях. Ваттметр ОМ3-65 используется для измерений в диапазоне 0,85 мкм, а ОМ3-66 — в диапазоне 1,3 мкм.

Принцип действия приборов основан на преобразовании оптического излучения фотоприемником в электрический сигнал, который далее усиливается, преобразуется и индицируется на цифровом индикаторе в размерности оптической мощности, поданной на вход прибора. В качестве фотоприемника в приборах используют фотодиоды. Конструктивно приборы выполнены из двух блоков: блока преобразователя и блока управления и индикации, соединенных между собой кабелями.

Прибор ОМЗ 65 имеет следующие основные характеристики диапазон длин волн измеряемой мощности 0,8 — 1 мкм, диапазон измеряемых мощностей 10^{-9} — 10^{-2} Вт, пределы измерения мощности 0,1, 1, 10, 100, 10^3 и 10^4 мкВт, индикация цифровая 3,5 десятичных разряда, время установления показаний не более 5 с, основная погрешность измерения на длине волны калибровки не более 15%, питание от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой 50 Гц или от автономного источника постоянного тока напряжением 12 — 15 В, потребляемая мощность 20 В А, габаритные размеры блока индикации и управления $308 \times 228 \times 120$ мм, блока преобразователя $80 \times 66 \times 44$ мм, масса 4 кг.

Прибор ОМЗ 66 имеет следующие основные характеристики диапазон длин волн измеряемой мощности 1,2 — 1,4 мкм, диапазон измеряемых мощностей 10^{-7} — 10^{-2} Вт, пределы измерения мощности 10, 10^2 , 10^3 и 10^4 мкВт, индикация цифровая 3,5 десятичных разряда, время установления показаний не более 5 с, основная погрешность измерения на длине волны калибровки не более 15%, эксплуатация при температуре окружающей среды 10 — 35°С, относительной влажности воздуха до 80% при 25°С и атмосферном давлении 84 — 106 кПа, питание от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой 50 Гц или от автономного источника постоянного тока напряжением 12 — 15 В, габаритные размеры блока индикации и управления $308 \times 228 \times 120$ мм, блока преобразователя $90 \times 66 \times 44$ мм, масса 4,4 кг.

Структурная схема ваттметра и его внешний вид даны на рис 8 10 В преобразователе, представляющем собой выносную малогабаритную головку, размещен термостат, в корпус которого вмонтирован фотодиод Динами-

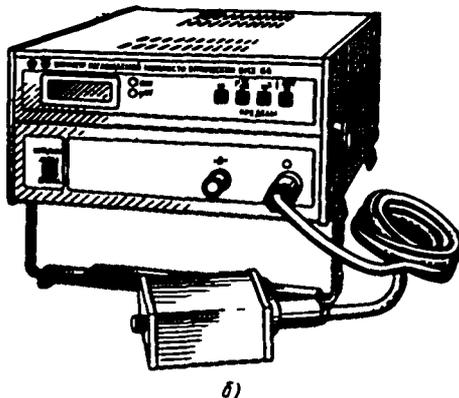
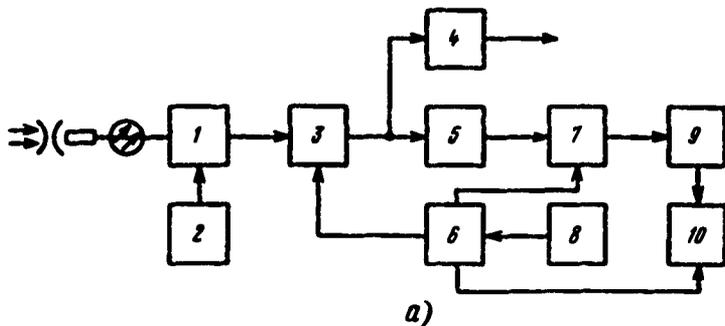


Рис 8 10 Ваттметр поглощаемой мощности ОМЗ-65

а — структурная схема, б — внешний вид

1 — преобразователь 2 — термостат, 3 — операционный усилитель преобразователя, 4 — вспомогательный усилитель, 5 — RC фильтр нижних частот 6 — коммутатор, 7 — усилитель 8 — сенсорный переключатель, 9 — аналого цифровой преобразователь, 10 — цифровое табло

ческий диапазон измеряемых мощностей прибора составляет несколько порядков. Его нижний предел ограничен несколькими факторами шумами фотодиода, преобразователя и резисторов на его входе, паразитными токами утечки в высокоомных цепях входного устройства и наличием входного тока операционного усилителя. Верхний предел динамического диапазона ограничен нелинейностью фотодиода. Ток фотодиода поступает на вход операционного усилителя преобразователя, выполненного на гибридной микросхеме с минимальным уровнем собственных шумов. Коэффициент передачи преобразователя может быть изменен ступенями на передней панели прибора за счет изменения глубины обратной связи операционного усилителя. С выхода операционного усилителя сигнал через RC-фильтр нижних частот поступает на усилитель, коэффициент усиления которого также может быть изменен (в 10 раз) на передней панели, что позволяет изменять пределы измерения мощности. Кроме того, выходной сигнал операционного усилителя подается на вспомогательный усилитель и с него — на отдельный выход, используемый для проверки линейности преобразования мощности — напряжение. С выхода усилителя напряжение, пропорциональное измеряемой мощности оптического излучения, поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, который осуществляет преобразование этого напряжения в цифровую форму для индикации мощности в цифровой форме. Все органы управления, используемые при эксплуатации прибора, расположены на передней панели блока управления и индикации. Здесь же расположены информационные элементы прибора: цифровое табло индикации значения измеряемой мощности, переключатели пределов измерения, индикатор перегрузки в случае, если мощность излучения на входе блока преобразователя больше, чем может быть измерена при установленном пределе измерения. В этом же блоке расположены аналого-цифровой преобразователь и коммутатор, обеспечивающий управление прибором с помощью сенсорного переключателя.

Оптический ваттметр поглощаемой мощности ОМКЗ-79. Ваттметр предназначен для измерения среднего значения мощности оптического излучения и длины волны. Совмещение в приборе функций измерителя мощности и длины волны упрощает исследование элементов, используемых в ВОСП.

Принцип действия прибора при измерении длины волны и среднего значения мощности основан на преобразовании фотоприемником оптического сигнала в электрический. В ваттметре обеспечиваются автоматические установка поддиапазонов и коррекция спектральной чувствительности фотоприемника. Измеряемая мощность и длина волны индицируются в цифровой форме по выбору оператора. Программное управление прибором осуществляется через интерфейс КОП. Отсчет длины волны производится в нанометрах, мощности — в ваттах или в уровнях относительно 1 мВт.

Прибор позволяет измерять длину волны излучения в диапазоне 600

1600 нм и среднее значение мощности в диапазоне 10^{-8} — 10^{-2} Вт. Погрешность измерения длины волны составляет 1% в диапазонах 0,75, 0,95 и 1,1, 1,56 мкм и 2% в диапазонах 0,6, 0,75, 0,95, 1,1 и 1,56, 1,6 мкм. Погрешность измерения среднего значения мощности не более 7%. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В или от автономного источника постоянного тока напряжением 15 В. Мощность, потребляемая прибором, 18 В А, габаритные размеры 80×288×308 мм, масса 6 кг.

Структурная схема прибора ОМКЗ-79 и лицевая панель прибора даны на рис. 8.11. Оптический сигнал поступает на вход прибора через разъем 0,6, 1,0 мкм или 1,0, 1,6 мкм. Включение оптических входов осуществляется с лицевой панели прибора. В разьеме установлена линза, которая формирует квазипараллельный пучок. В оптическом блоке между разъемом и фотоприемником вращается обтюратор, который разбит на три сектора: сектор полного затемнения пучка, сектор полного пропускания и сектор с интерференционным фильтром-зеркалом. При вращении обтюратора фотоприемник последовательно во времени формирует три уровня электрического сигнала: уровень собственных шумов, уровень, соответствующий полной оптической мощности, поступившей на вход прибора, и уровень сигнала, пропу-

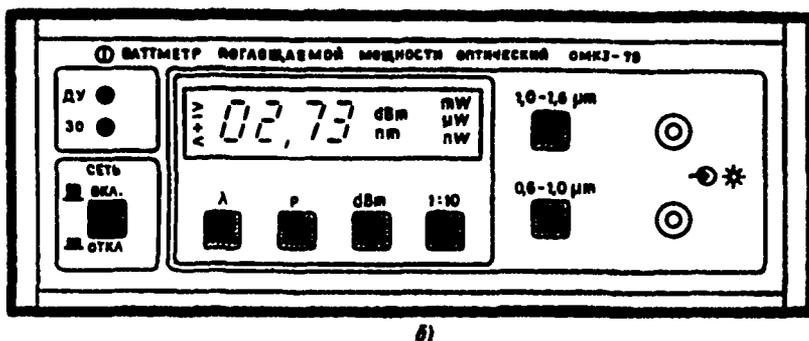
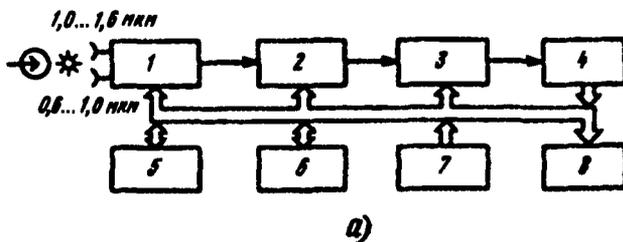


Рис 8 11 Прибор ОМК3-79:

а — структурная схема, *б* — лицевая панель.
 1 — оптический блок 2 — трансимпедансный преобразователь; 3 — усилитель коррекции;
 4 — АЦП, 5 — интерфейс КОП; 6 — микропроцессор, 7 — клавиатура; 8 — индикатор

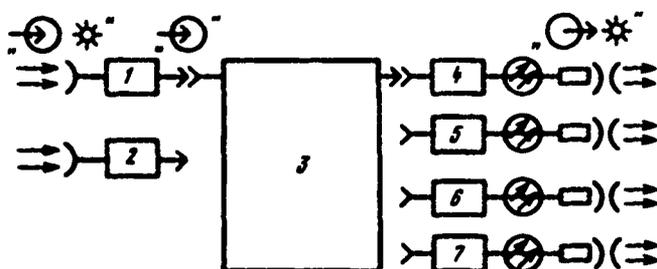
щенного фильтром-зеркалом. Сигналы с выхода фотоприемника усиливаются, корректируются, преобразуются в цифровую форму и обрабатываются микропроцессорной системой. Микропроцессорная система устанавливает коэффициент передачи преобразующе-усилительного тракта таким, чтобы сигнал на входе АЦП находился в пределах $0 \dots 10$ В, при этом прибор автоматически адаптируется к уровню измеряемой мощности. При полной оптической мощности, превышающей 100 мкВт, для исключения нелинейного участка характеристики преобразования фотоприемника процессор включает оптический аттенюатор. В ПЗУ микропроцессорной системы хранятся две таблицы коэффициентов коррекции: для спектральной характеристики чувствительности фотоприемника и для суммарной спектральной характеристики чувствительности аттенюатора и фотоприемника. Для измеренного значения длины волны процессор вычисляет коэффициент коррекции, используя линейную интерполяцию характеристики спектральной чувствительности и одну из двух таблиц в зависимости от выбранного диапазона. Индикация мощности производится с учетом коэффициента коррекции

Тестер оптический ОМК3-76. Тестер предназначен для измерения средней мощности оптического излучения и генерирования оптического излучения на длинах волн $0,85 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,1$ мкм и используется при настройке, регулировке и испытании компонентов и трактов ВОСП. Прибор выпускается в трех модификациях ОМК3-76 для длин волн оптического излучения $0,85$ и $1,3$ мкм, ОМК3-76А для длины волны $0,85$ мкм и ОМК3-76Б для длины волны $1,3$ мкм. Конструктивно прибор выполнен в виде блока индикации и оптоэлектронных блоков.

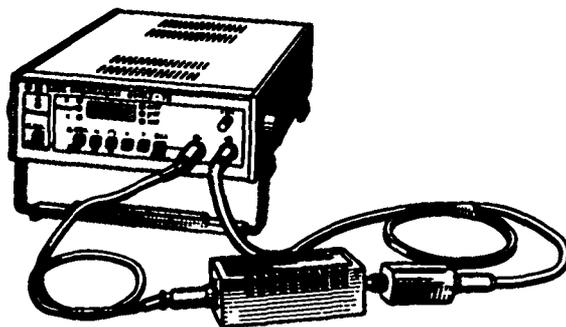
Принцип действия прибора основан на преобразовании электрического сигнала в оптический с помощью светодиода или лазерного диода при генерировании излучения и на преобразовании оптического сигнала в электри-

ческий фотодиодом при измерении мощности излучения. Для преобразования оптической мощности в диапазонах 0,85 и 1,3 мкм используются соответственно кремниевый и германиевый фотодиоды. Измерение оптической мощности производится в ваттах и децибелах. Для обеспечения измерений при наличии фоновой засветки осуществляется измерение мощности прямоугольно-модулированного частотой 270 Гц излучения. В этом случае сигнал дополнительно обрабатывается селективным усилителем, настроенным на частоту 270 Гц. В качестве излучателей используются лазерные диоды и светодиоды, работающие в диапазонах 0,85 и 1,3 мкм. Модуляция излучения производится от встроенного генератора частотой 270 Гц.

Прибор имеет следующие основные характеристики: длина волны оптического излучения на выходах преобразователей СИД-0,85 на светодиоде и ЛД-0,85 на лазерном диоде $0,85 \pm 0,1$ мкм, на выходах СИД-1,3 и ЛД-1,3 — $1,3 \pm 0,1$ мкм; мощность непрерывного немодулированного излучения на выходных разъемах СИД-0,85 не менее 10 мкВт, ЛД-0,85 не менее 300 мкВт, СИД-1,3 не менее 1 мкВт, ЛД-1,3 не менее 100 мкВт; нестабильность уровня выходной мощности, не более: для СИД-0,85, ЛД-0,85, СИД-1,3 и ЛД-1,3 соответственно 0,1; 0,5; 0,1 и 1 дБ. Диапазоны измерения средней мощности непрерывного излучения: на длине волны $0,85 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,1$ мкм соответственно $10^{-6} \dots 10^{-3}$ Вт ($-50 \dots 0$ дБм) и $10^{-7} \dots 10^{-3}$ Вт ($-40 \dots 0$ дБм). Диапазоны измерения мощности излучения прямоугольно-модулированного частотой 270 Гц со скважностью 2: на длине волны $0,85 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,1$ мкм соответственно $10^{-9} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ Вт ($-60 \dots -3$ дБм) и $10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ Вт



а)



б)

Рис. 8.12. Оптический тестер ОМК3-76:

а — структурная схема; б — внешний вид:
 1 — фотопреобразователь ФП-0,85; 2 — фотопреобразователь ФП-1,3; 3 — блок индикации;
 4 — преобразователь ЛД-0,85; 5 — преобразователь СИД-0,85; 6 — преобразователь ЛД-1,3;
 7 — преобразователь СИД-1,3

(—50...—3 дБм). Пределы допускаемого значения погрешности относительного измерения уровней мощности непрерывного излучения в диапазонах измеряемых мощностей на длине волны $0,85 \pm 0,1$ мкм не более 10%, а на длине волны $1,3 \pm 0,1$ мкм не более 15%. При измерении уровней мощности прямоугольно-модулированного излучения пределы допускаемого значения погрешности относительного измерения уровней мощности в диапазонах измеряемых мощностей на длине волны $0,85 \pm 0,1$ мкм и $1,3 \pm 0,1$ мкм составляют соответственно 11 и 16%.

Питание прибора осуществляется от автономного источника постоянного тока (батарея из 10 элементов РЦ85) или внешнего источника постоянного тока напряжением $12 \pm 1,5$ В. Потребляемая мощность не более 4,5 В·А. Нормальная эксплуатация осуществляется при температуре окружающей среды $20 \pm 5^\circ$ С, относительной влажности воздуха 30...80% при 20° С и атмосферном давлении 84...106 кПа. Предельные условия эксплуатации: температура $-40 \dots 50^\circ$ С, относительная влажность воздуха 95% при 25° С. Габаритные размеры блока индикации $80 \times 228 \times 308$ мм, преобразователей СИД и ЛД $40 \times 80 \times 115$ мм, фотопреобразователя ФП-0,85 $26 \times 36 \times 48$ мм, фотопреобразователя ФП-1,3 $30 \times 40 \times 51$ мм. Масса блока индикации 5 кг, преобразователей СИД и ЛД 0,5 кг, фотопреобразователей 0,15 кг.

Функциональная схема и общий вид прибора даны на рис. 8.12. Входящие в схему функциональные блоки имеют следующие назначения. Фотопреобразователи ФП-0,85 и ФП-1,3 преобразуют оптическое излучение соответственно на длинах волн $0,85 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,1$ мкм в электрический сигнал. Преобразователи СИД-0,85; СИД-1,3; ЛД-0,85 и ЛД-1,3 генерируют с помощью светодиодов и лазерных диодов оптическое излучение на длинах волн $0,85 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,1$ мкм. Блок индикации обеспечивает: усиление, преобразование и измерение электрического сигнала, поступающего с фотопреобразователя, индикацию в цифровой форме измеряемой мощности или ее уровня, автоматический выбор диапазона измерения мощности оптического сигнала и включение соответствующих индикаторов, управление преобразователями СИД и ЛД в режимах непрерывной генерации и прямоугольно-модулированного излучения.

Измеритель коэффициента ошибок ИКО-832. Измеритель предназначен для измерения коэффициента ошибок цифровых (кабельных и волоконно-оптических) систем передачи. Прибор может применяться для обнаружения неисправностей при пусконаладочных работах, эксплуатации, ремонте, настройке и испытаниях аппаратуры цифровых систем передачи по кабельным и волоконно-оптическим линиям, в том числе на предприятиях-изготовителях. Прибор выпускается в двух модификациях: ИКО-832 для работы на длине волны 0,85 мкм и ИКО-832/1 для работы на длине волны 1,3 мкм.

Принцип работы прибора и основан на определении количества ошибок $N_{\text{ош}}$ за время измерения $T_{\text{изм}}$. Коэффициент ошибок вычисляется по формуле $K_{\text{ош}} = N_{\text{ош}} T / T_{\text{изм}}$, где T — значение периода тактовой частоты. Функциональная схема прибора и его лицевая панель даны на рис. 8.13. Схема состоит из последовательно включенных оптоэлектронного преобразователя, входного устройства, устройства синхронизации M -последовательности и счетчика ошибок, управление которыми осуществляется блоком управления с оперативной памятью, а синхронизация и обмен данными производятся при помощи микроЭВМ, выполняющей функции калькулятора, таймера и синхронизирующего устройства. Оптоэлектронный преобразователь предназначен для приема цифровых оптических сигналов в трактах ВОСП и преобразования их в электрические с помощью фотодиода. Кодовая последовательность электрических импульсов поступает на входное устройство, которое нормализует проходящие импульсные сигналы по амплитуде и форме и декодирует их. Устройство синхронизации M -последовательности фиксирует нарушения структуры исходной последовательности и выдает сигналы на вход счетчика ошибок. Управление работой всех устройств прибора осуществляется микроЭВМ, которая выполняет вычисления и выдает результаты измерения на цифровое табло. Для вычисления коэффициента ошибок необходима инфор-

$2,048 \pm 0,0001024$, $8,448 \pm 0,000253$ и $34,368 \pm 0,000687$ МГц и электрических импульсов в режиме «по шлейфу» при подаче тактовых импульсов от внешних устройств в диапазоне 1–35 МГц. При приеме оптических импульсов прибор измеряет коэффициент ошибок при средней мощности 0,1–1 мВт. Прибор обеспечивает измерения коэффициента ошибок в пределах $9,9 \times 10^{-12}$ – $9,9 \cdot 10^{-3}$ для оптических и электрических сигналов в бинарном, бифазном и СМ1-кодах и ЧПИ и МЧПИ (HDB-3)-кодах для электрических сигналов. Предел допустимого значения погрешности измерения коэффициента ошибок не более 1% при времени измерения 100 с и более. Счет числа ошибок производится за 1, 10, 100, 1000 с и произвольно задаваемое время. Погрешность установки интервала времени не более 5%.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой $50 \pm 0,5$ Гц при содержании гармоник не более 5%. Потребляемая мощность не более 120 В·А. Рабочие условия эксплуатации: температура окружающей среды 5–40°С, относительная влажность воздуха до 80% при 25°С.

Оптический рефлектометр ОР-2. Оптический рефлектометр (рис. 8.14) предназначен для проведения в диапазоне 0,85 мкм совместно с промышленным импульсным прибором Р5-13 следующих измерений: определения расстояния до места повреждения (обрыва), определения длины оптических волокон при прокладке и монтаже оптических кабелей, определения потерь в местах соединения и приближенного определения затухания и его распределения по длине оптического кабеля. Прибор рассчитан на подключение оптического кабеля с волокном 50/125 мкм, армированным стандартным соединителем диаметром 2,5 мм.

Диапазон измерения расстояния (развертка по горизонтالي) с растяжкой шкалы равен 0–10 км, а без растяжки шкалы 0–20 км. Основная погрешность измерения расстояния (точность отсчета), м, в диапазоне с растяжкой шкалы составляет $10 \pm 0,01 L$ а без растяжки шкалы $100 \pm 0,05 L$ (L — измеренное значение расстояния). Длительность зондирующего импульса 50–2000 нс. Максимальное затухание исследуемого по сигналу обратного рэлеевского рассеяния оптического кабеля 15 дБ. Максимальное затухание при обнаружении места повреждения и коэффициенте отражения 4% от этого места 30 дБ.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и от встроенного автономного источника постоянного тока напряжением 10–15 В. Потребляемая мощность при питании от сети переменного тока не более 25 и 16 В·А при питании от источника постоянного тока. Рабочие условия эксплуатации: температура окружающей среды –30–50°С, относительная влажность воздуха до 98% при 35°С.

Конструктивно прибор состоит из двух блоков прибора Р5-13 и оптоэлектронного преобразователя (ОЭП).

Оптический рефлектометр MW910C. Рефлектометр MW910C фирмы Anritsu (Япония) — высокоточный измерительный прибор, предназначенный для обнаружения и измерения расстояния до места дефектов оптического кабеля, измерения потерь в кабеле и соединителях. В состав прибора входят основной блок и сменные блоки, позволяющие производить измерения в диапазонах длин волн $0,85 \pm 0,02$, $1,31 \pm 0,2$ и $1,55 \pm 0,02$ мкм многомодовых и одномодовых кабелей, графопостроитель, встроенный принтер для термочувствительной бумаги и др.

Основной блок MW910C имеет следующие технические характеристики

Развертка по горизонтали (полная шкала), км
 $0,25, 0,5, 1, 2,5, 5, 10$ (диапазон 18 км),
 $0,25, 0,5, 1, 2,5, 5, 10, 20$ (диапазон 36 км);
 $0,25, 0,5, 1, 2,5, 5, 10, 20, 40$ (диапазон 72 км),
 $0,25, 0,5, 1, 2,5, 5, 10, 20, 40, 80$ (диапазон 144 км)
Разрешающая способность считывания, м 1 (полная шкала 0,25 и 0,5 км);
2 (полная шкала 1 км), 10 (полная шкала 2,5 и 5 км), 20, 40, 80, 160 (полная шкала соответственно 10, 20, 40 и 80 км). Точность отсчета $\pm 3 \pm 2 \cdot 10^{-5} L$, м

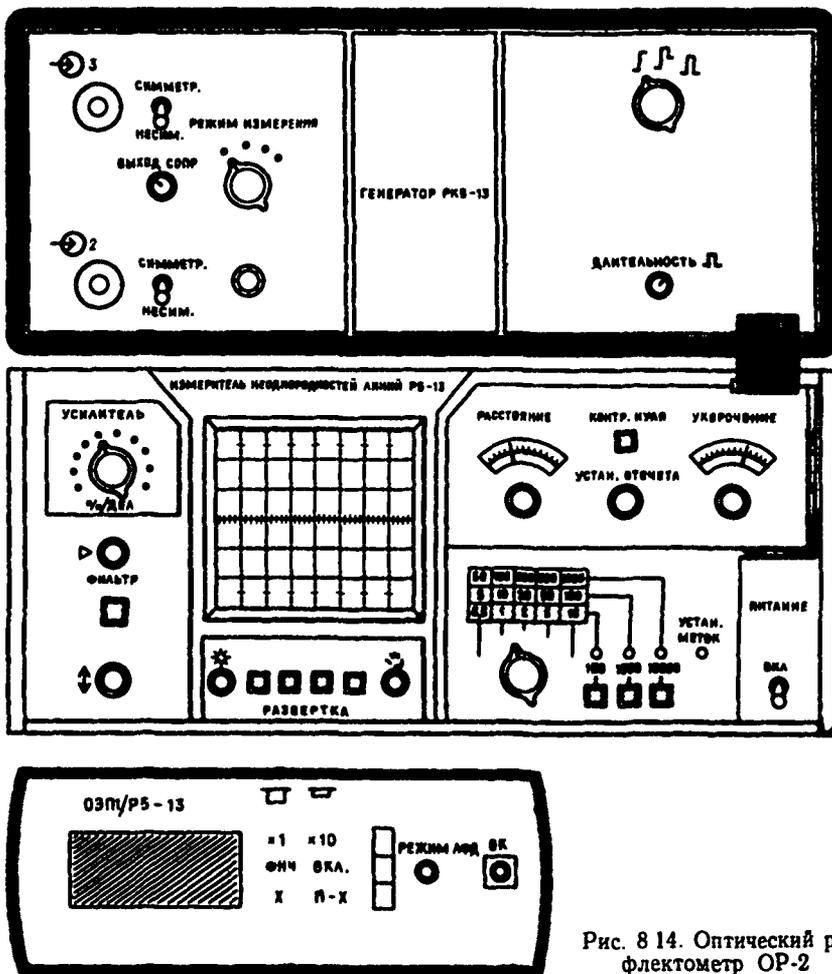


Рис. 8 14. Оптический рефлектометр ОР-2

Развертка по вертикали, дБ/дел.: 0,2; 0,5; 1; 2,5; 4. Разрешающая способность считывания 0,01 дБ. Линейность вертикальной развертки: $\pm 0,3$ дБ в диапазоне 0...5 дБ, $\pm 0,5$ дБ в диапазоне 0...10 дБ и $\pm 0,7$ дБ в диапазоне 0...15 дБ.

Питание основного блока может осуществляться от сети переменного тока с различными параметрами, в том числе напряжением 220 В $\pm 10\%$ и частотой 50 Гц. Рабочий диапазон температуры окружающей среды — 15...55°С. Габаритные размеры блока 177×284×381 мм, масса не более 13,7 кг.

Основные технические характеристики сменных блоков со стандартным динамическим диапазоном (типа А — с встроенным светодиодом, типа А1 — без встроенного светодиода) приведены в табл. 8.5. Технические характеристики сменных блоков с большим динамическим диапазоном (типа С — с встроенным светодиодом, типа С1 — без встроенного светодиода) приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.5

Характеристика	МН963А/А1	МН937А/А1	МН938А/А1	МН939А/А1	МН955А/А1
Рабочая длина волны, мкм	0,85±0,02	1,31±0,02	1,31±0,02	1,55±0,02	1,31/1,55±±0,02
Измеряемое волоконно-градиентное	Многомодовое градиентное	Многомодовое градиентное	Одномодовое	Одномодовое	Одномодовое
Длительность зондирующего импульса, мкс*	0,1; 0,5; 2	0,1; 0,5; 2	0,1; 1; 4	0,1; 1; 4	0,1; 1; 4
Динамический диапазон, дБ**	17, 20, 23	15, 19, 22	12, 17, 20	10, 15, 18	10/8; 15/13; 18/16

* Для диапазона 18 км длительность импульса не должна быть 2 и 4 мкс.

** Динамический диапазон показывает максимально измеряемое затухание.

Таблица 8.6

Характеристика	МН938С/С1	МН939С/С1	МН955С/С1
Рабочая длина волны, мкм	1,31±0,02	1,55±0,02	1,31/1,55±0,02
Измеряемое волоконно-градиентное	Одномодовое	Одномодовое	Одномодовое
Длительность зондирующего импульса, мкс	0,1; 1; 10	0,1; 1; 10	0,1; 1; 10
Динамический диапазон, дБ	20, 25, 30	17	—

Таблица 8.7

Характеристика	Seiko Instruments		Auritsu	
	SX-101	SX-102	MS94A	MS97A
Рабочая длина волны излучения, мкм	0,85	1,3	0,85±0,03	1,3±0,02
Ширина спектра излучения, нм	<50	≤20	≤2	≤5
Уровень мощности выходного излучения, не менее, дБм	-25	-30	-10	-7
Частота сигнала модуляции, Гц	—	—	270	270
Диапазон измеряемой мощности, дБм	-60...+10	-55...0	-80...0	-75...0
Погрешность измерения	±5%	±0,2 дБ	±0,5 дБ	±0,5 дБ
Индикация	Дисплей 4 разряда	Дисплей 4 разряда	Стрелочная	Стрелочная
Размерность шкалы измерения	дБм, нВт, мкВт, мВт	нВт, мкВт, мВт, дБм	дБм	дБм
Габариты, мм	34×85×150	36×85×190	—	—
Масса, кг	0,365	0,550	≤1	≤1
Температура окружающей среды, °С	0...40	—	0...40	0...40

Таблица 8.8

Фирма-изготовитель	Модель	Диапазон длин волн, мкм	Тип кабеля	Диапазон измерения, дБм	Погрешность измерения	Размерность шкалы измерения
Ando Corp.	AQ-1135E	0,4...1,7	О, М	-90...10	5%	дБм, пВт...мВт
	AQ-1125	0,6...1,7	О, М	-70...10	5%	дБм, нВт...мВт
Anritsu	ML96B	0,38...1,8	О, М	-60...10	5%	дБм, нВт...мВт
	ML93B	0,38...1,8	О, М	-90...10	5%	дБм, пВт...мВт
Fotec	M200	0,665; 0,82; 0,85	О, М	-60...3	0,2 дБ	дБм; мкВт, мВт
	M210A	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-50...3	0,4 дБ	дБм, мкВт, мВт
	M410	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-60...3	0,4 дБ	дБм, мкВт, мВт
Philips Komm. Industrie AG	OPM-6	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-60...5	0,6 дБ	дБм
	OPM-10	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-90...10	0,6 дБ	дБм, дБ
Photodyne	22XLC	0,4...1,8	О, М	-80...33	0,01 дБ	дБм
	16XT	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-65...3	0,01 дБ	дБм, Вт
United Detector Technology	S371/260	0,36...1,1	О, М	-80...3	0,01 дБ	дБм, нВт
	S371/261	0,8...1,8	О, М	-60...0	0,01 дБ	дБм, дБ, нВт
	S390/260	0,36...1,1	О, М	-90...3	0,01 дБ	дБм, дБ, нВт
Wilcom Products	T319/T330	0,85	М	-65...3	0,2 дБ	дБм, мкВт
	T339	0,85; 1,3; 1,55	О, М	-65...0	0,2 дБ	дБм

Таблица 8.9

Фирма-изготовитель	Модель	Диапазон длин волн, мкм	Тип кабеля	Максимально измеряемое затухание, дБ	Погрешность измерения, дБ
Ando Corp	AQ-3106	1,3; 1,55	О, М	65	1,5...3,0
	AQ-1006	0,85; 1,3	О, М	55	0,5
	AQ-1029	1,3	О	75	0,5
Anritsu	MN95C/D	0,85; 1,3	М	65	1,0
	MN932	1,3; 1,55	О	65	1,0
	MP910	0,85	М	40	0,5...1,0
	MN924	1,3; 1,55	О	65	1,0
NKT	OAM30-MM850	0,85	М	55	0,25
	OAM30-SM1300	1,3	О	40	0,25
	OAM30-SM1550	1,55	О	40	0,25
Photodyne	22XLC	0,4...1,8	О, М	70	0,01
	16XT	0,82; 0,85; 1,3; 1,55	О, М	70	0,01
United Detector Technology	S371/260	0,36...1,1	О, М	83	0,01
	S371/261	0,8...1,8	О, М	53	0,01
	S371/S1261-TE	0,8...1,8	О, М	50	0,01
Wilcom Products	T312B	0,85	М	68	0,5
	T324B	1,3	О, М	65	0,5
	T331	0,85; 1,3; 1,55	О, М	68	0,5

Краткие технические характеристики некоторых зарубежных измерительных приборов, предназначенных для выполнения измерений в волоконно-оптических трактах, приведены в табл. 8.7—8.11. В табл. 8.7 приведены параметры оптических тестеров, в табл. 8.8 — оптических ваттметров, в табл. 8.9 — приборов для измерения затухания, в табл. 8.10 — приборов для измерения дисперсии или полосы пропускания и в табл. 8.11 — оптических рефлектометров.

Таблица 8.10

Фирма-изготовитель	Модель	Диапазон длин волн, мкм	Тип кабеля	Диапазон измерений	Погрешность измерений
Ando Corp.	AQ-7501	1,2...1,3	О	-5...+5 пс/км·нм	$\pm 0,35$ пс/(нм·км)
	AQ-7502	1,2...1,55	О	-20...+20 пс/км·нм	$\pm 0,35$ пс/(нм·км)
	AQ-7505	1,3...1,55	О	5...800 МГц	
Anritsu	ME96A, B, C	0,85; 1,3	М	1...800 МГц	± 10 нс на 0,85 мкм ± 20 нс на 1,3 мкм
	ME99A	1,3; 1,55	О, мМ	0,1...1000 МГц	$\pm 0,28$ пс/(нм·км)
NKT	ODB54	0,85; 1,3	М	до 750 МГц	5%
	ODB54A	0,85; 1,3	М	до 1500 МГц	5%
Opto-Electronics	FPS10	0,85; 1,3; 1,55	О, М	10...8000 МГц	1%
	PFOS	0,85; 1,3; 1,55	О, М	20...500 пс	1%
Siccor	M70-001	1,3	О, М	10...400 МГц	± 10 МГц
	M75-00L	1,3	О	До 10 нс	$\pm 0,5$ пс/(нм·км)
	M70-S/L	0,85; 1,3	О, М	10...400 МГц	± 10 МГц

Таблица 8.11

Фирма-изготовитель	Модель	Длина волны, мкм	Тип кабеля	Динамический диапазон, дБ	Разрешающая способность, м (%)	Диапазон расстояний, км
Ando Corp.	AQ-7106	0,85	M	22	0,5	10
	AQ-7109/03	1,31	O	16	0,5	32
	AQ-7110/14	1,55	O	16	0,5	128
Anritsu	MW98A/MH913B	0,85	M	22	1,0	72
	MW98A/MH914B	1,3	M	20	1,0	72
	MW98A/MH929A	1,55	O	14	1,0	72
	MW920A/MH952A	1,3	M	16	0,1	40
Biddle Instruments	655108	0,83	M	17	(1,0)	10
	655213	1,3	O, M	22	—	42
Cossor	OFL108L	0,83	M	17	(1,0)	10
	OFL213	1,3	O, M	23	20 (на 42 км)	42
Iskra	OTDR85M	0,85	M	24	1,0	—
	OTDR130M	1,3	O, M	19	1,0	—
Laser Precision	TD-9920	0,85	M	20	0,5	20
	TD-9940	1,3; 1,55	O	18	1,0	64
	TD-9950	0,85; 1,3; 1,55	O, M	24	1,0	131

Глава 9

Проектирование волоконно-оптических линий связи

9.1. Общие сведения

При проектировании волоконно-оптических линий связи, которые являются наиболее дорогой и сложной частью системы электросвязи, особое внимание должно быть обращено на уменьшение удельного веса расходов по капитальному строительству и эксплуатации линий.

Проектные решения должны разрабатываться с учетом новейших достижений науки и техники, чтобы строящаяся линия ко времени ее ввода в действие была технически передовой и имела высокие технические и экономические показатели. Требования и нормы, предъявляемые к трактам ВОС, вытекают из принципа построения Единой автоматизированной сети связи и генеральной схемы развития связи страны. При этом должны соблюдаться рекомендации и нормы МККТТ на каналы передачи информации. Проект разрабатывается для всего комплекса. Обоснованием для выполнения работ по проектированию является задание на проектирование, которое выдается организацией-заказчиком проектирующей организации.

При проектировании ВОЛС следует учитывать следующие положения: последовательность проектирования — от общего к частному. Вначале проводят обоснование экономической целесообразности и необходимости сооружения ВОС в целом, а затем детализацию по отдельным вопросам и устройствам (конструкции кабелей, трасса прокладки, системы передачи, электропитание, размещение регенерационных пунктов и т. д.);

вариантность проектирования. Рассматривается несколько вариантов решений, и на основе технико-экономических показателей выбирается оптимальный;

использование типовых проектов. Типовое проектирование позволяет уменьшать стоимость строительства по сравнению со строительством по индивидуальным проектам;

проведение технико-экономических обоснований хозяйственной необходимости сооружения объекта и его эффективности.

9.2. Топология сети

Система связи состоит из средств передачи информации: линии и аппаратуры, устройств коммутации и оконечных устройств. По капитальным затратам наибольший удельный вес занимают линейные сооружения и аппаратура передачи информации, поэтому очень важно выбрать оптимальный вариант построения сети, т. е. структуру сети.

Сеть состоит из узлов (пунктов коммутации цепей, каналов) и «ребер» (линий связи), соединяющих эти узлы между собой.

При построении сети связи следует исходить из задачи сделать ее экономичной и надежной. Надежность обеспечивается созданием разветвленной сети и применением различных типов линий связи. На линиях связи организуют требуемое число каналов с обходными, резервными путями. Необходимо, чтобы каждый узел связи имел два-три обходных пути к другим узлам. Существенным требованием является также построение сети в наиболее короткие сроки. Возможно несколько вариантов структурного построения сети связи (рис. 9.1):

полносвязное (каждый с каждым), при котором любой узел имеет прямые связи со всеми остальными узлами (рис. 9.1, а);

узловое, при котором несколько пунктов группируются в узлы, соединяющиеся между собой (рис. 9.1, б);

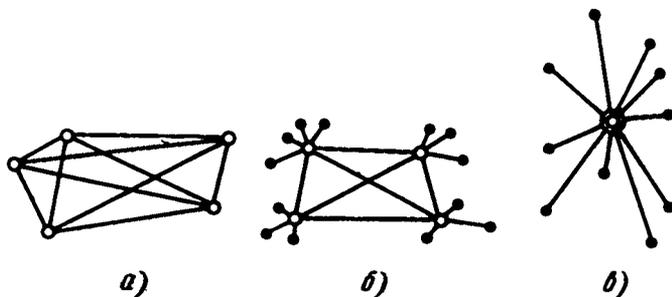


Рис. 9.1. Варианты построения сетей связи:

a — непосредственное соединение; *б* — узловое; *в* — радиальное

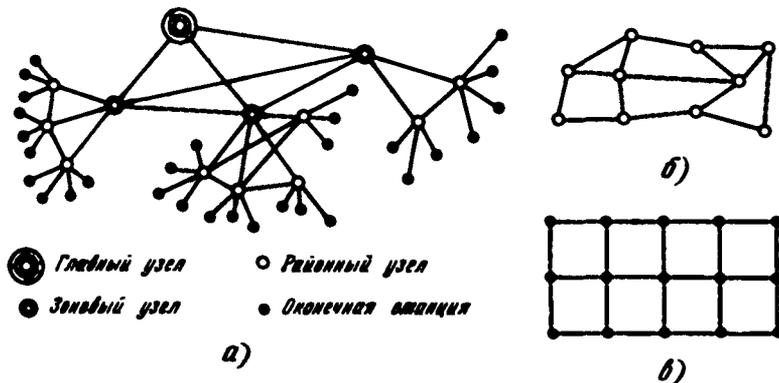
радиальное (звездообразное), при котором имеется лишь один узел с расходящимися линиями по радиусам к другим пунктам (рис. 9.1, *в*).

Непосредственное соединение каждого пункта с каждым наиболее надежно, но в технико-экономическом отношении невыгодно. Неэкономична и узловая система. Радиальная система наиболее дешевая, но она не имеет никаких путей резервирования и не обеспечивает непрерывности связи.

Наилучшие результаты дает сочетание радиальной и узловой систем. Такая система позволяет создавать разветвленную, устойчивую и в то же время довольно экономичную сеть связи. Схема радиально-узловой системы построения сети (рис. 9.2, *а*) характеризуется тем, что одноименные узлы связи соединяются линиями не только с нижестоящими узлами, но и между собой. Радиально-узловая система связи является основной при построении сети связи страны на основе электрических кабелей (симметричных и коаксиальных). Имеются все основания принять ее также и при проектировании оптических сетей связи.

Во всех случаях следует стремиться создать сеть связи, при которой каждый узел связи связан со смежными ближайшими узлами или узлами, имеющими наибольшее тяготение. При этом создаются обходные, резервные пути и обеспечивается два—три независимых выхода к любому узлу связи (рис. 9.2, *б*).

Разновидностью сетевидной сети являются решетчатые (ячеистые) структуры (рис. 9.2, *в*), которые очень надежны, но требуют больших капитальных затрат на их сооружение.



- Главный узел
- Районный узел
- Зональный узел
- Конечная станция

Рис. 9.2. Структура сети связи:

а — радиально-узловая, *б* — сетевидная; *в* — решетчатая

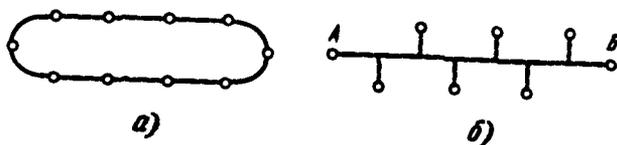


Рис. 93 Локальные распределительные сети.
а — кольцевые, б — линейные

В оптических распределительных системах локального назначения (объектовая связь, сети ЭВМ и др) применяются также кольцевые (рис 93, а) и линейные (рис 93, б) конфигурации В кольцевой структуре абоненты включены с помощью оптических ответвителей последовательно в замкнутое кольцо, по которому передается информация В линейной структуре между оконечными станциями А и Б последовательно включены промежуточные абоненты, имеющие связь с этими станциями Кольцевая система обладает несколько большей надежностью по сравнению с линейной

9.3. Выбор трассы прокладки кабельной линии

Выбор трассы линии определяется прежде всего расположением пунктов, между которыми должна быть обеспечена связь Обычно рассматривается несколько вариантов трассы и на основе технико-экономического сравнения выбирается оптимальный При выборе трассы необходимо обеспечить

- наискратчайшее протяжение трассы,
- наименьшее число препятствий, усложняющих и удорожающих стоимость строительства (реки, карьеры, дороги и прочие препятствия),
- максимальное применение механизации при строительстве,
- создание наибольших удобств при эксплуатационном обслуживании,
- наименьшие затраты по осуществлению защиты линии от установок сильного тока и атмосферного электричества

Исходя из этих требований предпочтение отдается прокладке кабеля вдоль автомобильных дорог

Ниже приведены минимально допустимые расстояния, м, от трассы кабелей связи до других сооружений

От мостов автомобильных и железных дорог магистрального назначения через внутренние водные пути	
судоходные реки	1000
сплавные реки	300
несплавные и несудоходные реки	50
От мостов автомобильных и железных дорог местного назначения через реки.	100
судоходные	200
остальные	50
От края подошвы насыпи путепроводов, автомобильных и железных дорог	5
От шоссе и ж д путепроводов	По проекту
От опор ЛЭП и контактных сетей ж д или их заземлений при удельном сопротивлении грунта, Ом/м	
до 100	0,83 $\sqrt{\rho}$
до 500	10
до 1000	11
более 1000	0,35 $\sqrt{\rho}$
От блоков телефонной канализации и колодцев	0,25
От силовых кабелей, трубопроводов городской канализации и водопровода	0,5
От газопроводов и теплопроводов в городах	1

От газопроводов высокого давления (5,4 МПа) и других продуктопроводов на загородных трассах	10
От водопроводов разводящей сети диаметром, мм:	
до 300	0,5
свыше 300	1
От заземлений молниеотводов воздушных линий связи	25
От опор воздушных линий связи и рельсов трамвайных путей	По проекту
От красной линии домов в городах и поселках городского типа	1,5

Переходы через водные преграды выбирают в тех местах, где река имеет наименьшую ширину, где нет скальных и каменистых грунтов, заторов льда и т. д. Берега реки в месте перехода не должны быть обрывистыми. Кабель нежелательно прокладывать: по берегу, где имеются оползни и пльвуны, зыбкие и болотистые грунты, а также в местах водопоя и стоянки скота. Нельзя также прокладывать кабель в районах пристаней, зимних стоянок судов, в местах перекаатов и отмелей, быстрого течения реки, в местах, где проходящие плоты для торможения хода могут спускать лоты или якоря. Расстояние между основными и резервными переходами должно быть не меньше 300 м

Глубина подземной прокладки оптических кабелей так же, как и электрических, 1,2 м.

В кабельной канализации ГТС оптический кабель следует прокладывать в свободном канале; в этом же канале в последующем можно прокладывать и другие оптические кабели. Прокладка электрических кабелей совместно с оптическими в одном канале запрещена. При острой необходимости использовать занятый канал следует оптический кабель прокладывать в полиэтиленовой трубе ПНД-32-Т.

Не допускается перекрещивание кабелей, расположенных в горизонтальном ряду в смотровых устройствах, помещениях ввода кабелей и коллекторах

Кабельные переходы через водные преграды можно выполнять путем прокладки под водой, по мосту или путем подвески на опорах. Наиболее надежной является подводная прокладка.

Изыскание по выбору трассы можно разделить на два основных этапа. На первом этапе работы подбирают картографические материалы, изучают природные условия районов прохождения трассы по литературным и другим источникам, например архивным материалам, существующим проектам шоссейных и железных дорог, трубопроводов и других инженерных сооружений, трасса которых совпадает с направлением проектируемой магистрали.

Второй этап работы заключается в рекогносцировочных изысканиях непосредственно на местности, целью которых являются уточнения и корректировка трассы, намеченной при предварительных изысканиях по картам. На этом этапе уточняют места расположения усилительных пунктов, проводят предварительное согласование направления трассы и других проектных решений с заинтересованными организациями, выявляют необходимые данные об эл. ж. д., линиях электропередачи, связи, трубопроводах и других сооружениях, имеющих сближения с проектируемой трассой.

Для определения подверженности кабельных цепей опасным и мешающим влияниям и определения вероятности повреждения кабеля от разрядов молнии измеряют проводимость земли.

Для разработки плана организации строительства и сметно-финансовых расчетов уточняют пути поступления грузов на строительство, возможности использования существующих складов и разгрузочных площадок, размещение новых площадок и складов, расстояния и способы доставки материалов на склады, цены на местные материалы и т. д.

Промежуточные обслуживаемые и необслуживаемые усилительные пункты размещают исходя из допустимых длин усилительных участков при принятой системе передачи проектируемой линии. Обслуживаемые усилительные

пункты обычно размещают в городах, пригородах или в крупных населенных пунктах, где питание аппаратуры обеспечивается от местных источников электроэнергии. Места установки усилительных пунктов первоначально выбирают при предварительных изысканиях трассы по карте. Затем проводят проверочный расчет, который определяет правильность предварительных принятых решений с точки зрения обеспечения требуемого качества связи. Для устойчивой работы высокочастотных систем передачи необходимо, чтобы изменение затухания линий во времени не превышало пределов регулирования устройств АРУ.

При проектировании средств и методов защиты ВОЛС от атмосферного электричества, электромагнитных воздействий и коррозии следует иметь в виду следующее.

полностью диэлектрические кабели, состоящие из стекла и пластмассы, не подвержены этим воздействиям и дополнительной защиты не требуют; оптические кабели, содержащие металлические элементы (медные, стальные провода, броню, алюминиевые оболочки и др.) следует защищать обычными традиционными способами, как и электрические кабели,

9.4. Выбор ВОСП и кабелей

При проектировании трактов оптической связи необходимо в первую очередь принять оптимальные решения по выбору волоконно-оптической системы передачи, типу оптического кабеля и по вопросу энергообеспечения магистралей. В настоящее время в волоконно-оптических системах передачи общего пользования используется унифицированная каналообразующая аппаратура цифровых систем передачи (ЦСП) различных ступеней иерархии. Системы передачи с частотным разделением каналов по оптическим кабелям еще не нашли практического применения, что связано с определенными трудностями в обеспечении качественных показателей линейного тракта, таких как затухание нелинейности и собственные шумы групповых усилителей.

У нас созданы следующие системы передачи: ИКМ-120-4/5 (ранее «Соната-2») с аппаратурой ИКМ-120, «Сопка-3» с аппаратурой ИКМ-480, «Соната-4» с аппаратурой ИКМ-1920. Известны также системы на 7680 каналов.

Требованию магистральной сети, предназначенной для передачи информации на большие расстояния (1000 км и больше) и большое число каналов (несколько тысяч), удовлетворяет четвертичная цифровая система «Сопка-4», рассчитанная на 1920 каналов. Исходя из требуемой дальности связи рекомендуется применение одномодовых световодов, обеспечивающих длины регенерационных участков в 30...100 км. Восьмиволоконный кабель ОК-8 обеспечивает получение 7680 каналов.

Известны два варианта четвертичных цифровых систем передачи для магистральной сети: «Сопка-4», работающая на волне 1,3 мкм с регенерационными участками длиной 30 км, и «Сопка-4М», работающая на волне 1,55 мкм с участками длиной 70...100 км. Вторая система является более предпочтительной. Основные характеристики этих систем передачи приведены в гл. 6.

На зонавых сетях рекомендуется применение системы передачи «Сопка-3», работающей на волне 1,3 мкм с третичной цифровой аппаратурой ИКМ-480. Система обеспечивает потребности зонавой связи по числу каналов (до 1920 каналов) и дальности передачи (до 600 км). Основные характеристики системы приведены в гл. 6.

Для городских телефонных сетей (организации соединительных линий между АТС) предназначена аппаратура ИКМ-120-4/5 (на 120 каналов), работающая на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм. В этом случае достигается дальность связи 12 и 30 км соответственно, что, как правило, обеспечивает связь между АТС в пределах города без регенерационных пунктов. Число каналов по восьмиволоконному кабелю составляет 480. Основные характеристики системы приведены в гл. 6.

Для сельской связи и вещания рекомендуется первичная аппаратура ИКМ-30×2, которая по четырехволоконному кабелю ОК-4 позволяет получить 120 каналов на длине волны 1,3 мкм. Затухание составляет 1 дБ/км, дальность связи 30 км, полоса пропускания 250...400 МГц·км.

Изготавливаемые отечественные оптические кабели содержат 4,8 и 16 волокон. Волокна классифицируются на ступенчатые, градиентные и одномодовые, используемые соответственно на длинах волн 0,85; 1,3 и 1,55 мкм. Кабели могут изготавливаться с металлическими элементами (оболочки, оплетки, армирующие стержни) и без них. Достоинствами ОК без металла являются существенно меньшие габаритные размеры и масса, неподверженность грозовым и импульсным воздействиям, а также промышленным помехам. Однако при отыскании трассы прокладки таких кабелей возникают определенные трудности и невозможно организовать дистанционное электропитание регенерационных пунктов.

Оценивая различные конструкции ОК применительно к различным звеньям сети связей, при проектировании ВОЛС можно рекомендовать:

для магистральной связи использовать кабели ОМЗКГ и ОКЛ с одномодовыми волокнами, обеспечивающие на волне 1,55 мкм и большие дальность связи и число каналов. Кабели ОМЗКГ и ОКЛ предназначены для подземной прокладки и поэтому имеют защитный покров из стальных лент проволоки или стеклопластиковых нитей;

для зоновой связи необходимы применение градиентных волокон и работа на волне 1,3 мкм, поэтому используются кабели ОЗКГ и ОКЗ и преимущественно аппаратура ИКМ-480. Зоновые кабели прокладывают непосредственно в грунт, и поэтому для защиты от атмосферного электричества и грызунов они имеют металлический покров (оболочку, бронеленты).

Для городской телефонной связи используют кабели ОК-50 и ОКК, которые на волнах 0,85 и 1,3 мкм с помощью аппаратуры ИКМ-120 обеспечивают требуемые дальность связи и число каналов. Так как городские кабели прокладываются в телефонной канализации, то они изготавливаются в пластмассовой оболочке.

для сельской телефонной связи целесообразно применять кабели четырехволоконной конструкции (ОК-4), которые можно подвешивать и прокладывать в землю. Эти кабели поверх сердечника имеют стальную оплетку и пластмассовую оболочку.

Основные характеристики оптических кабелей приведены в гл. 3.

9.5. Электропитание ВОЛС и длины регенерационных участков

При проектировании ВОСП необходимо рассматривать также вопросы электропитания магистрали и длины регенерационных участков.

В настоящее время получили развитие три варианта электропитания необслуживаемых регенерационных пунктов: дистанционное по металлическим элементам ОК, от автономных электроустановок и от местной электросети. В качестве металлических элементов могут использоваться токопроводящие жилы, металлические стержни, а также металлические оболочки. Для автономного питания НРП рекомендуется применение теплоэлектрогенераторов (ТЭГ) или радионуклидных генераторов (РИТЭГ). При проектировании должна широко использоваться электросеть, расположенная по трассе прокладки кабеля. Известно также применение ветро- и солнечных генераторов.

Сравнивая указанные первые два способа электропитания НРП, можно отметить, что электропитание от автономных электроустановок выгодно в технико-экономическом отношении лишь при больших длинах регенерационных участков (50...100 км), а при малых длинах (до 20...30 км) эффективна система дистанционного электропитания.

При проектировании системы ВОЛС рекомендуется:

на магистральной сети, имеющей большие длины регенерационных участков (30...100 км), использовать местную электросеть или применять автономные электроустановки ТЭГ и РИТЭГ;

на зоновой сети с $l_p=30$ км применять дистанционное электропитание по медным жилам,
 на ГТС и СТС при наличии НРП последние питать от местной электросети, расположенной на трассе прокладки кабеля

Для оптических линий связи с цифровыми системами передачи, у которых в регенераторах сигнал полностью восстанавливается и накопления помех не происходит, важно знать длину регенерационного участка. Длина регенерационного участка ВОЛС определяется энергетическим потенциалом аппаратуры (\mathcal{E}) и передаточными параметрами кабеля его коэффициентом затухания α и дисперсией τ . Затухание приводит к ослаблению сигнала и уменьшению дальности передачи l_α , дисперсия приводит к ограничению пропускной способности световода ($\Delta F=1/\tau$), которая сказывается тем сильнее, чем длиннее линия $l_{\Delta F}$.

Как показано в § 2.12, длина регенерационного участка выбирается по наименьшему значению l_α или $l_{\Delta F}$, но так, чтобы выполнялись требования по затуханию сигнала α и полосе пропускания ΔF . Как видно из рис. 2.27, с увеличением длины линии возрастает затухание цепи αl , которое не должно превышать энергетический потенциал системы (\mathcal{E}), обычно составляющий 35–40 дБ. Одновременно с увеличением длины линии уменьшается пропускная способность световода ΔF . В этом случае границей является требуемая полоса частот для используемой системы $\Delta F_{\text{доп}}$. Так, для цифровых систем передачи ИКМ-480 скорость составляет 34 Мбит/с и соответственно $\Delta F_{\text{доп}} \approx 34$ МГц. Из рис. 2.27 видно, что по затуханию длина участка составляет 18 км, а по пропускной способности — 14 км. Длину регенерационного участка следует принять по наименьшему значению, в данном случае по пропускной способности $l_{\Delta F}=14$ км.

В общем виде ограничивающим фактором при выборе длины участка может быть как дисперсия τ , так и затухание α . Для многомодовых световодов длина регенерационного участка и дальность связи соответственно лимитируются дисперсией и полосой пропускания, а для одномодовых световодов, обладающих хорошими дисперсионными характеристиками, длина участка и дальность связи определяются затуханием световодного тракта.

Результаты расчета максимальных длин регенерационных участков при различных скоростях передачи по многомодовому ступенчатому волокну приведены в табл. 9.1. Из таблицы видно, что при малых значениях скоро-

Таблица 9.1

Определяющий фактор	Значение l_p при v , Мбит/с		
	2	8,5	34
Затухание	19	16	14
Дисперсия	23	7	2

сти передачи информации ($v=2$ Мбит/с) величина l_p лимитируется затуханием световодов, а при средних и больших значениях ($v=8,5$ Мбит/с) — дисперсией. При $v=34$ Мбит/с практически исключается возможность использования ступенчатых световодов, и в этом случае необходимо применять градиентные, а лучше одномодовые световоды, имеющие малую дисперсию.

В существующих системах цифровой передачи по оптическим кабелям длина регенерационного участка при $\lambda=0,85$ мкм составляет 10–20 км, а в перспективных системах на длинах волн 1,3 или 1,55 мкм может достигать 50–100 км.

На рис. 9.4 приведены основные информационные характеристики существующих оптических кабелей. Длина регенерационного участка l_p и скорость передачи v . Из рисунка видно, что лучшими свойствами обладают кабели с одномодовыми волокнами, которые позволяют применять пятилучную систему передачи ИКМ-7680 ($v=560$ Мбит/с) с длиной регенера-

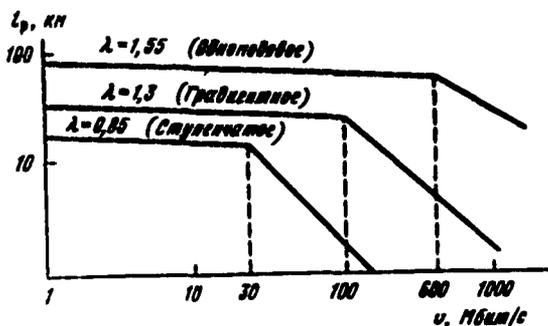


Рис. 9.4. Пропускная способность и длины участков ВОЛС

онных участков порядка 100 км. Существенно худшие результаты у ступенчатых волокон, обеспечивающих длину участка 20 км и скорость передачи всего лишь 30 Мбит/с. Промежуточное положение занимают градиентные волокна.

В определенном диапазоне скоростей все три типа волокон имеют довольно стабильное значение длины участка L_p , а затем с увеличением v длина участка уменьшается за счет дисперсии.

9.6. Техничко-экономическое обоснование эффективности ВОЛС

Решение о проектировании ВОЛС принимается исходя из схемы развития связи и на основе ТЭО, подтверждающего целесообразность и эффективность сооружения данного объекта. При этом рассматриваются варианты решений и выбирается оптимальный. ТЭО разрабатывается в целом на комплекс сооружения ВОЛС (линию, станцию, аппаратуру, НРП и т. д.).

При проектировании ВОЛС производится сравнение оптической системы связи с существующей электрической, базирующейся на коаксиальных и симметричных кабелях.

В табл. 9.2 приведены обобщенные данные стоимости сооружения ма-

Таблица 9.2

Показатель	Стоимость магистрали из кабелей		
	оптических	коаксиальных	симметричных
Техническое задание	2,6	4,47	9,6
Жилищное строительство	2	3,18	5,8
Станционные сооружения	11,3	21,00	18,9
Линейные сооружения, в том числе:			
изыскание трассы	0,6	0,95	0,6
прокладка	5	8,2	10,3
стоимость кабеля (с учетом транспортировки)	52	27,4	24,6
монтаж и измерения	13	7,76	5,2
защита от влияния и коррозии	0,5	2,04	2,5
Необслуживаемые регенерационные пункты	13	25,0	22,5
Итого	100%	100%	100%

гистральных трактов из оптического, коаксиального и симметричного кабелей из расчета на 1000 км (в процентах). Из таблицы видно, что в оптических трактах большой удельный вес занимает стоимость линейных сооружений (порядка 70% и больше) из-за большой стоимости оптических кабелей.

Рассмотрим экономическую эффективность электрических и оптических кабелей и определим стоимость канала-километра связи с учетом повышения цен. Ниже приводится ориентировочная стоимость кабелей, причем в числителе указаны цены, действовавшие до 31.12.91, а в знаменателе — с 01.01.93, тыс. руб./км. Из-за дороговизны меди стоимость электрических кабелей возросла примерно в 100 раз, оптических — в 12 раз, а стоимость НРП — примерно в 10 раз.

ОК-4:

городской	5/60
зоновый	6/72
магистральный	9/108

ОК-8:

городской	8/100
зоновый	9/108
магистральный	14/166

МКС-4×4

.	2/200
МКТ-4	2,7/300
КМБ-4	4,8/500

Сравнение стоимости одного канала-километра оптического кабеля ОК-8 с коаксиальным кабелем КМБ-4 для магистральной связи, оптического кабеля ОК-4 с малогабаритным коаксиальным кабелем МКТ-4 для зоновой связи и оптического кабеля ОК-8 с симметричным кабелем МКС-4×4 для городской связи по ценам на 01.01.93 дано в табл. 9.3—9.5 соответственно.

Таблица 9.3

Показатель	КБМ-4			ОК-8		
	ИКМ-120	ИКМ-480	ИКМ-1920	ИКМ-120	ИКМ-480	ИКМ-1920
Стоимость кабеля, тыс. руб./км	500	500	500	166	166	166
Стоимость регенератора, тыс. руб.	80	80	8	350	350	350
Длина регенерационного участка, км	12	6	3	70	70	70
Стоимость регенератора, на 1 км трассы, тыс. руб.	6,66	13,2	26,4	5	5	5
Стоимость 1 км трассы (кабель+регенератор), тыс. руб.	506,7	513,2	526,4	171	171	171
Число каналов	240	960	3840	480	1920	7680
Стоимость 1 кан.-км, тыс. руб.	2,108	0,534	0,138	0,356	0,089	0,022

Таблица 9.4

Показатель	МКТ-4			ОК-4	
	ИКМ-30	ИКМ-120	ИКМ-480	ИКМ-120	ИКМ-480
Стоимость зонowego кабеля, тыс. руб./км	300	300	300	72	72
Стоимость регенератора, тыс. руб.	80	80	80	300	300
Стоимость регенератора на 1 км трассы, тыс. руб.	6,67	13,3	26,7	10	10
Длина регенерационного участка, км	12	6	3	30	30
Стоимость 1 км трассы, кабель+регенератор, тыс. руб.	306,7	313,3	326,7	82	82
Число каналов	60	240	960	240	960
Стоимость 1 кан.-км, тыс. руб.	5,11	1,3	0,54	0,34	0,085

Таблица 9.5

Показатель	МКС-4×4	ОК-8
Система передачи	ИКМ-30	ИКМ-120
Дальность связи, км	10	30
Стоимость 1 км кабеля, тыс. руб.	2000	8000
Число каналов	120	480
Стоимость 1 кан.-км кабеля, тыс. руб.	16,7	16,6
Стоимость двух регенераторов, тыс. руб.	100	—
Стоимость регенераторов на 1 км трассы, тыс. руб.	3,33	—
Стоимость 1 км трассы (кабель+регенератор), тыс. руб.	203,33	—
Стоимость 1 кан.-км кабеля, тыс. руб.	1,69	0,21

Примечание Последние четыре строчки приведены для линии длиной 30 км.

Из приведенных данных видно, что по ценам января 1993 г. оптический кабель экономичней электрического с медными проводниками во всех звеньях сети (магистраль, зона, город) и при любом числе каналов связи. Ранее, до подорожания меди оптический кабель был эффективен лишь при большом числе каналов (примерно свыше 1000). Учитывая, что тенденция роста цен продолжается, в приведенные таблицы следует периодически вносить соответствующие коррективы.

Высокая технико-экономическая эффективность оптических кабелей обусловлена, в первую очередь, двумя факторами: большой пропускной способностью и значительной длиной регенерационных участков (30...70 км для ОК и 3...6 км для ЭК). Все это позволяет рекомендовать широкое применение оптических кабелей на сети связи страны, особенно в случаях передачи

Больших потоков информации. Оптический кабель экономичен и не требует для своего изготовления дефицитных металлов (медь, свинец).

Сравнительные зарубежные данные эффективности оптических и электрических кабелей приведены в табл. 9.6.

Таблица 9.6

Система передачи	Электрический кабель		Оптический кабель		Область применения
	Тип кабеля	Длина регенерационного участка, км	Длина волны, мкм	Длина регенерационного участка, км	
ИКМ-30 (2 Мбит/с)	Симметричный	1,5...4,5	0,85	15	Сельская связь Городская связь
ИКМ-120 (8,5 Мбит/с)	Коаксиальный	0,7/2,9 1,2/4,4	0,85 1,3	14 17	
ИКМ-480 (34 Мбит/с)	Коаксиальный	0,7/2,9 1,2/4,4 2,6/9,5	— 0,85 1,3	— 12 39	Зоновая связь
ИКМ-1920 (140 Мбит/с)	Коаксиальный	1,2/4,4 2,6/9,5	1,3 1,55	40 100	

Из табл. 9.6 видна высокая эффективность оптических кабелей. Так, при работе системы ИКМ-480 по электрическому кабелю длина усилительного участка составляет 9,3 км, а по оптическому кабелю 12 км на волне 0,85 мкм и 39 км на волне 1,3 мкм. В настоящее время длина участка водена до 50...100 км.

Важнейшим параметром эффективности системы является стоимость одного канала-километра связи. На рис. 9.5 приведены зарубежные данные стоимости канала-километра связи в зависимости от числа каналов, образующих с помощью оптических и электрических кабелей. Из рисунка видно, что стоимость связи по оптическим кабелям падает с ростом числа каналов в более резкой зависимости. По сравнению с электрическим оптические системы намного дороже при небольшом числе каналов и более дешевы при большом числе каналов.

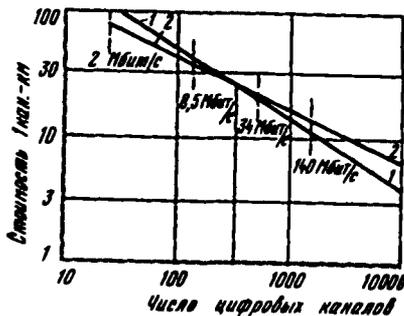


Рис. 9.5. Сравнение стоимости канала-километра оптических (1) и электрических (2) кабелей

По зарубежным данным, оптические системы передачи информации целесообразно применять, начиная с 500—1000 каналов, а исходя из экономии меди — при любом числе каналов. По данным США, стоимость 1 кан.-км оптического кабеля составляет 70...75% стоимости электрического кабеля.

При проектировании систем связи и выборе типа линии следует в первую очередь учитывать стоимость канала связи. Ниже приведена сравнительная технико-экономическая эффективность (в процентах) наиболее ши-

роко применяемых в настоящее время типов линий связи (за 100% принята стоимость 1 кан.-км воздушной линии с медными проводами $d=4$ мм):

Симметричный кабель ($d=1,2$ мм)	. . . . .	.35 ... 50
Коаксиальный кабель типа 2,6/9,4 мм	. . . . .	.10 ... 15
Малогабаритный коаксиальный кабель типа 1,2/4,4 мм	. . . . .	.9
Радиорелейная линия ($N=600$)	. . . . .	.15%

Эффективность применения тех или иных типов линий связи во многом зависит от потребного числа каналов связи и телевизионного вещания на проектируемой магистрали, принятых систем передачи, соотношения стоимости кабеля и аппаратуры и других факторов. Целесообразность применения различных типов линий связи в зависимости от потребного числа каналов:

До 50	. . . . .	Воздушная линия
До 500	. . . . .	Симметричный кабель
До 5000	. . . . .	Коаксиальный кабель
От 1000 и выше	. . . . .	Оптический кабель

Глава 10

Строительство ВОЛС

10.1. Особенности строительства ВОЛС

Основные этапы строительства ВОЛС и линий связи с традиционными кабелями совпадают. Это позволяет использовать сложившуюся структуру строительных организаций связи: строительно-монтажное управление (СМУ) или передвижная механизированная колонна (ПМК) и входящие в их состав прорабские или мастерские участки. Силами этих участков выполняют такие основные работы по строительству, как разбивка трассы линии и определение мест установки НРП на местности в соответствии с проектом на строительство, доставка оборудования, кабеля и других материалов на трассу, испытание, прокладка и монтаж кабеля и оконечных устройств, проведение приемосдаточных испытаний.

Отличия в организации, технологии строительства, монтажных работах и эксплуатации ВОЛС в значительной степени обуславливаются тем, что у ОК в отличие от электрических кабелей нет параметров, характеризующих состояние элементов кабельного сердечника и его защитных покровов (сопротивление изоляции, пробивное напряжение изоляции и герметичность оболочки). Отсутствие таких параметров в ОК требует изменений в порядке проведения приемосдаточных испытаний, а также в процессе дальнейшей эксплуатации ВОЛС.

Ряд существенных отличий в проведении линейных работ на ВОЛС обусловлен также следующим своеобразием конструкции ОК:

критичностью к растягивающим усилиям, малыми поперечными размерами и массой ОК;

большими строительными длинами ОК;

сравнительно большими величинами затухания сростков оптических волокон;

невозможность содержания ОК под избыточным воздушным давлением; трудностями при организации служебной связи при строительстве ВОЛС с ОК без металлических элементов;

недостаточным развитием методов и отсутствием приборов для измерений и отыскания мест повреждений на ОК.

Таблица 10.1

Особенности конструкции ОК	Подготовка к строительству	Входной контроль ОК	Прокладка ОК	Монтаж ОК
Критичность к растягивающим усилиям	<p>Определение истинных расстояний на местности между колодцами, перепадами и т. д.; специальная подготовка персонала, участвующего в прокладке; подготовка запаса ОК (до 10%) для первых участков</p>	<p>100-процентная проверка кабелей на затухание; по окончании измерений — последовательное соединение волокон ОК для образования шлейфа, по которому контролируют процесс механизированной прокладки</p>	<p>Применение специальных механизмов; прокладка с одновременным контролем целостности ОВ; прокладка ОК в две стороны от середины участка; прокладка на участках ГТС преимущественно в свободных каналах</p>	<p>Высокая квалификация монтажников; специальная разметка ОК в смонтированных устройствах; применение муфт повышенной сложности</p>
Малые диаметр и масса, большие строительные длины	<p>Выбор оптимальной стратегии прокладки ОК</p>	<p>Группирование стропильных длин ОК</p>	<p>Стремление прокладывать большими длинами; повышенная трудоемкость при прокладке на участках ГТС</p>	<p>Особая тщательность при сварке конусов муфт с тонкостенной оболочкой ОК</p>
Большое затухание стростков ОВ, сравнимое с затуханием строительных длин ОК	<p>Специальная подготовка монтажников</p>	<p>Пробная сборка регенерационного участка на кабельной площадке при использовании новых марок кабелей</p>	<p>Исключение появления дополнительных стыков; применение специальных приспособлений</p>	<p>Сварка волокон с контролем затухания, монтаж в специальных передвижных монтажно-измерительных лабораториях</p>
Невозможность содрержания ОК под избыточным давлением	<p>Специальные проектные решения по повышению надежности ВОЛС</p>	<p>Трудовой контроль целостности оболочки; контроль наличия по концам ОК гидрофобного заполнения</p>	<p>Визуальный контроль оболочки при прокладке</p>	<p>Повышение трудоемкости монтажа; обязательная проверка герметичности муфты после монтажа</p>

Эти особенности ОК, обусловленные в известной мере недостаточным опытом их производства и прокладки, сказываются практически на всех этапах строительства и вызывают необходимость введения существенных изменений в практику строительства и эксплуатации ВОЛС.

В табл. 10.1 показана взаимосвязь особенностей конструкции ОК с характером работ, проводимых на разных этапах строительства ВОЛС. Анализ данных этой таблицы позволяет сделать вывод о значительном перераспределении трудозатрат на отдельных этапах строительства ВОЛС по сравнению со строительством традиционных линий. Следует отметить качественный сдвиг трудозатрат на первые этапы, вызванный необходимостью специальной подготовки персонала, большим объемом подготовительных работ при входном контроле, контроле при прокладке и монтаже. Объем измерительных работ составляет не менее 35...40% общего объема работ по строительству ВОЛС, в отличие от 12...15% при строительстве обычных кабельных линий связи. Значительно больший объем времени занимают операции по сращиванию ОВ и монтажу муфт ОК, требующие к тому же значительно более квалифицированной подготовки монтажников.

10.2. Подготовка к строительству ВОЛС

Начальные этапы подготовки строительства. На первых этапах подготовки строительства ВОЛС, как правило, выполняют следующие работы: составляют проект производства работ (ППР); решают организационные вопросы взаимодействия строительной организации с представителями заказчика; проводят подготовку персонала к выполнению основных строительно-монтажных операций; проводят входной контроль ОК; решают задачи материально-технического снабжения будущего строительства.

Непосредственно подготовка к строительству конкретной ВОЛС начинается с того, что производственный отдел СМУ с участием прораба разрабатывает ППР — один из основных документов, по которому затем производят строительно-монтажные работы на линейных участках. Этот документ составляют на основе детального ознакомления с проектной документацией и подробно обследовании на местности трассы строящейся ВОЛС. Особое внимание при обследовании трассы ВОЛС уделяют измерению истинных расстояний на местности между телефонными колодцами, переходами через дороги и другими препятствиями. На основании этих данных затем выбирают оптимальные планы прокладки ОК на различных участках трассы, детализируют технологию строительства ВОЛС, составляют календарный план производства работ по участкам с учетом трудоемкости отдельных операций, схему транспортировки грузов для обеспечения строительства, рассчитывают потребность машин и механизмов.

До начала поступления кабеля на строительство ВОЛС наряду с работами по обязательному обследованию будущего трасс прокладки и определению мест и помещений для проведения входного контроля ОК должны быть решены вопросы организации служебной связи с помощью радиостанций УКВ диапазона. Эти, а также другие дополнительные работы, которые подробнее будут рассмотрены ниже, учитывают при составлении ППР. Там же должна быть учтена повышенная трудоемкость выполнения всех операций при строительстве ВОЛС.

Подготовка рабочих мест и необходимых устройств для обучения персонала. Для качественного выполнения работ по прокладке, монтажу и измерениям ОК необходима весьма основательная специальная подготовка персонала, учитывающая особенности процессов в ОК на всех этапах строительства и эксплуатации. Типовая программа курсов по обучению монтажу и прокладке ОК рассчитана на 150...200 ч. Примерно 30...35% программы отводится на теоретические занятия по изучению основ ВОСП, конструкции отдельных элементов ВОЛС, а остальное время — на практические занятия по сварке различных видов ОВ, монтажу соединительных муфт и измерениям затухания ОК. Особое внимание при этом уделяется обработке

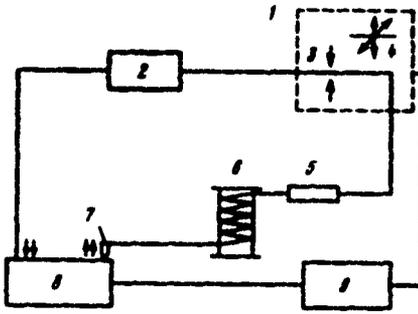


Рис. 10.1. Функциональная схема рабочего места для обучения сварке ОВ:

1 — сварочный аппарат; 2 — нормализующее устройство; 3 — электроды; 4 — юстировочное устройство сварочного аппарата; 5 — оптический сросток; 6 — катушка с ОВ; 7 — адаптер; 8 — оптический тестер; 9 — блок питания

сращивания оптических волокон. Рабочие места оснащаются аппаратом для сварки оптических волокон с комплектом инструментов для разделки ОК и ОВ, оптическим тестером с запасом волокна, рефлектометром, вращающимися стульями с регулируемой высотой сидений, источниками местного освещения, блоками питания для оптического тестера и сварочного аппарата.

На рис. 10.1 изображена функциональная схема рабочего места для обучения сварке ОВ и измерению их затухания. При включении питания оптического тестера сигнал с выхода излучателя поступает в предварительно обработанный (очищенный от защитного покрытия и перпендикулярно сколотый) конец ОВ, а затем на вход нормализующего устройства. Нормализующее устройство предназначено для установления в световоде режима равновесного распределения модового состава и вывода излучаемых мод, распространяющихся по светоотражающей оболочке световода. При этом в волокне возникает установившийся режим, необходимый для уменьшения погрешностей измерения затухания ОВ. Далее сигнал по волокну, пропущенному между электродами сварочного аппарата, проходит через катушку с ОВ и через адаптер подается в приемную часть тестера к фотоприемнику.

После отработки операций скола концы ОВ заправляют в прижимы сварочного аппарата и обрабатывают операции юстировки, сведения и сварки ОВ, контролируя ее качество по показаниям оптического тестера.

Подготовка персонала и само строительство ВОЛС требуют применения ряда устройств, приспособлений и, как будет показано ниже, даже отдельных механизмов, которые в настоящее время не изготавливаются серийно или являются дефицитными (приспособления для растворения защитного покрытия ОВ, нормализующие устройства для измерения затухания ОВ, комплекты для защиты места сростка ОВ, блоки питания для оптического тестера и сварочного аппарата и др.). Конструкция их относительно проста, и они могут быть изготовлены на обычном станочном или сварочном оборудовании.

На рис. 10.2 приведен эскиз конструкции нормализующего устройства, представляющего собой металлический футляр с системой цилиндров. На каждом цилиндре намотано по одному витку ОВ. Для ОВ с эпоксикарилатным покрытием при измерении на длине волны 1,3 мкм диаметр цилиндров равен 25 мм, при длине волны 0,85 мкм — 10 мм.

Для питания комплекта сварки световодов КСС необходим блок питания мощностью не менее 100 Вт.

При обучении операциям скола и сращивания ОВ, их измерениях при входном контроле значительные трудности представляет операция снятия защитного покрытия ОВ. Снятие эпоксикарилатного покрытия наиболее удобно производить химическим способом, растворяя его с помощью подогретого до определенной температуры растворителя. Для этой цели удобно изготовить специальный термостат для подогрева и поддержания заданной температуры растворителя. На рис. 10.3 приведена функциональная схема

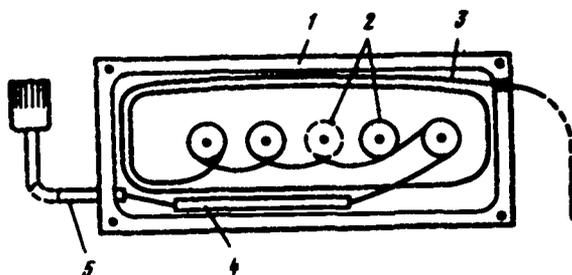


Рис. 10.2. Нормализующее устройство (вид сверху без крышки):

1 — металлический корпус; 2 — катушки с намотанным на них одним витком ОВ; 3 — запас ОВ длиной 20 м; 4 — сварное соединение ОВ с одноволоконным ОК с разъемом; 5 — кабель с разъемом для подключения к измерительному прибору

Рис. 10.3. Функциональная схема устройства для химического удаления защитного покрытия ОВ:

1 — растворитель; 2 — оптическое волокно; 3 — металлический сосуд; 4 — нагревательный элемент; 5 — термодатчик; 6 — теплоизоляция; 7 — устройство сравнения; 8 — блок питания и сигнализации

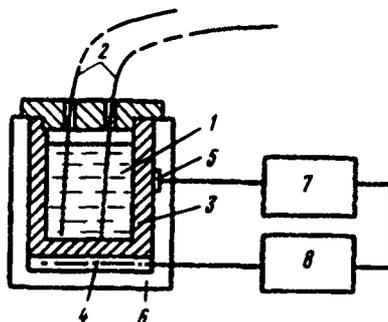


Таблица 10.2

Растворитель	Время выдержки в растворе до полного размягчения защитного покрытия ОВ, мин, при температуре		Класс опасности растворителя*
	+24 °С	+50 °С	
Ацетон	3	1	4
Муравьиная кислота	3	1	2
Дихлорэтан	—	1	2
Уксусная кислота	—	1	2
Диметилформамид	—	1	2
Растворитель 646	—	3	—
Растворитель 647	—	3	—

* С возрастанием номера класса степень опасности снижается.

такого устройства, а в табл. 10.2 даны оптимальные режимы для снятия защитного покрытия различными растворителями.

В ходе подготовки к строительству кроме операций сращивания ОВ и измерения их затухания персонал должен быть ознакомлен со всеми этапами и особенностями технологии строительства ВОЛС. Они изложены в руководствах, технологических картах (ТК) и картах трудовых процессов (КТП), перечень которых приведен в Приложении I.

10.3. Входной контроль ОК

Неустоявшаяся технология производства ОК и отсутствие оперативных методов отыскания мест повреждения на ВОЛС определяют необходимость проведения стопроцентного входного контроля ОК, поступающих на строительство ВОЛС.

В состав работ при входном контроле входят: внешний осмотр кабельных барабанов и концов ОК, проверка документации и вскрытие барабанов, испытание элементов кабельного сердечника, оформление протоколов входного контроля ОК, а при необходимости — мелкий ремонт ОК и барабанов, их перемотка, соединение шлейфом ОВ при механизированной прокладке, обшивка барабанов и заделка концов ОК.

Как и у обычных кабелей, входной контроль ОК начинается с внешнего осмотра целостности кабельных барабанов, проверки наличия паспортов и затем испытаний элементов кабельного сердечника.

Если выведенный на шеку барабана нижний конец кабеля имеет длину, недостаточную для разделки при измерении затухания оптических волокон, то кабель следует перемотать, выведя необходимый запас нижнего конца ОК ($2 \pm 0,3$ м) на шеку барабана. Во время перемотки необходимо осуществлять визуальный контроль за целостностью наружной оболочки кабеля. При вскрытии концов ОК нужно убедиться в наличии гидрофобного заполнения.

Наиболее часто выявляющиеся отклонения от технических условий на ОК: повышенное затухание и обрывы оптических волокон, наличие утолщений кабельного сердечника, отсутствие гидрофобного заполнения по концам ОК, повреждение оболочек, отсутствие паспортов, несоответствие реальной длины паспортным данным. Как правило, незначительные повреждения кабельной продукции с согласия заказчика устраниают на месте.

При выявлении серьезных повреждений барабанов или кабеля, которые могут затем проявиться при транспортировании и прокладке ОК, а также привести к снижению эксплуатационной надежности ВОЛС, должен быть составлен коммерческий акт с участием представителей подрядчика и заказчика и решен вопрос о рекламации.

У кабелей с цепями для передачи дистанционного питания НРП проводят испытания целостности жил и качества их изоляции — измерение сопротивления изоляции и испытания ее напряжением в соответствии с паспортом ОК. Кроме того, измеряют затухание оптических волокон. Для оценки пригодности кабеля к прокладке и влияния строительных операций на качество ОК измеряют затухание всех ОВ и сравнивают с паспортными значениями. Следует учитывать, что возникающие в некоторых случаях отклонения от паспортных данных объясняются применением различных методик измерения и приборов. В процессе строительства контроль за целостностью ОВ и их затуханием удобно осуществлять методом обратного рассеяния с помощью рефлектометра. На входном контроле рефлектограммы снимают с обоих концов строительных длин; в случае заметных расхождений измеренных величин затухания с паспортными данными измерения перепроверяют *методом обрыва ОВ*.

После окончания электрических измерений ОК составляют протокол входного контроля по установленной форме. Входной контроль ОК занимает гораздо больше времени, чем контроль электрических кабелей, так как при его проведении требуются особая чистота на рабочем месте и отсутствие влияний атмосферных условий. Поэтому после внешнего осмотра барабанов на площадке входной контроль ОК следует проводить в специально оборудованном помещении. Трудоемкость выполнения входного контроля одного барабана с 4-волоконным ОК составляет 16 чел.-ч.

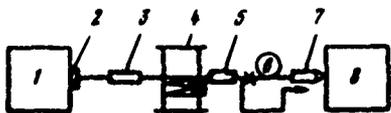


Рис. 10.4. Схема рабочего места для проверки затухания ОВ:

1 — источник излучения; 2 — модуль волоконно-оптический, оконцованный разъемом; 3 — оптический сросток; 4 — нормализующая катушка с ОВ или специальное нормализующее устройство; 5 — оптический сросток; 6 — оптический кабель; 7 — адаптер, 8 — приемник излучения; х — место обрыва волокна при измерении

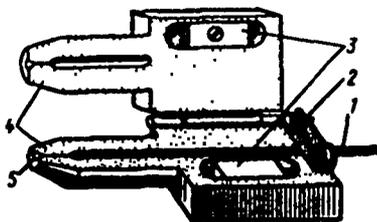


Рис. 10.5. Установка ОВ в адаптер: 1 — ОВ; 2 — пружинный прижим; 3 — магнитный прижим; 4 — направляющая канавка; 5 — сколотый торец ОВ с очищенным от защитного покрытия участком

На рис. 10.4 приведена схема организации рабочего места для измерения затухания ОВ в проверяемых строительных длинах ОК. В качестве излучателя применяют преобразователь СИД-0,85 (СИД-1,3), входящий в комплект оптического тестера ОМКЗ-76. Для облегчения заделки ОВ в приемное устройство используют специальный адаптер. На рис. 10.5 показан порядок установки ОВ в адаптер.

Кроме мест для измерения должны быть предусмотрены механизмы для перемотки ОК с барабана на барабан, тельфер грузоподъемностью до 3 т, а также площадка для проведения мелкого ремонта кабельных барабанов и устранения дефектов оболочки ОК.

Площадь помещений должна позволять разместить запас кабеля, предназначенный для строительства целого регенерационного участка. Как правило, на одном регенерационном участке следует прокладывать строительные длины ОК одной марки и одним типом защитного покрытия оптических волокон.

При работе с новыми марками кабеля или волокна целесообразно собрать регенерационные участки до прокладки, соединив сваркой концы волокон строительных длин ОК без установки соединительных муфт. На таком искусственном участке можно оценить ожидаемое суммарное затухание оптических волокон, проверить работу регенераторов и в случае необходимости обоснованно предьявить рекламацию на кабель. В дальнейшем, после установления технологии производства и монтажа ОК и аппаратуры, очевидно, можно будет отказаться от практики сборки регенерационного участка на кабельной площадке.

Учитывая, что в настоящее время технология изготовления ОК окончательно не отработана, для обеспечения нормального хода строительства го-

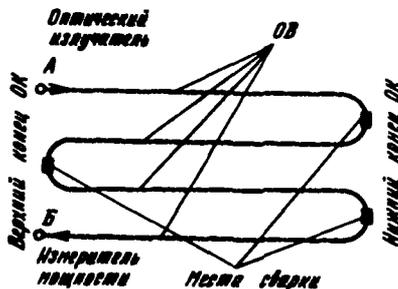


Рис. 10.6. Схема соединения ОВ и ОК для контроля целостности при механизированной прокладке



Рис. 10.7. Закрепление нижнего конца ОК на внешней щеке барабана

ловного и последующих участков ВОЛС желательно предусмотреть комплектование их кабелем с 10-процентным запасом. (В дальнейшем, по мере накопления опыта, эта норма будет уточнена.). Оставшийся кабель может быть использован для прокладки следующих регенерационных участков или передан заказчику в качестве эксплуатационного запаса.

После окончания электрических измерений ОВ междугородных и внутризоновых кабелей их соединяют последовательно (сваривают) для образования шлейфа, по которому при механизированной прокладке и перед монтажом муфт можно контролировать целостность ОК (рис. 10.6). Концы кабеля герметично заделывают и барабан с проверенной строительной длиной после группирования вывозят на трассу (рис. 10.7).

Группирование строительных длин кабеля заключается в подборе такой его физической длины, чтобы при прокладке ОК на регенерационном участке окончания строительных длин находились непосредственно перед препятствиями (трубопроводами, переходами через дороги и т. д.). Группирование позволяет уменьшить число муфт на ВОЛС.

10.4. Прокладка ОК в грунт

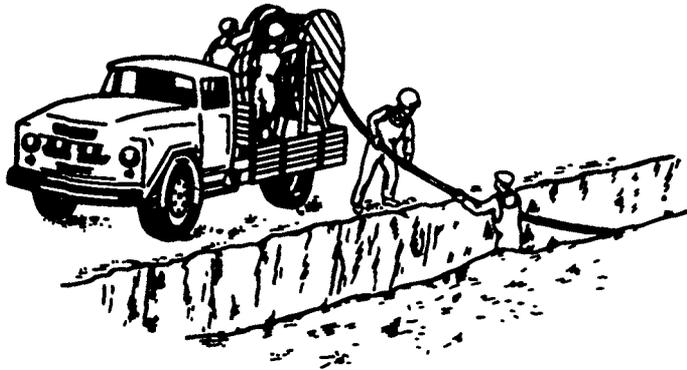
Состав основных работ по прокладке ОК. В состав работ входят: разбивка трассы; подготовка переходов на пересечениях трассы с дорогами, препятствиями и др. (прокладка трубопроводов с последующей протяжкой ОК); прокладка ОК в грунт кабелеукладчиком или разработка траншей (механизмами или вручную). Одновременно проводят сопутствующие работы по развозке ОК к месту прокладки и вывоз барабанов, подготовке котлованов для монтажа муфт, засыпке траншей, фиксации трассы проложенного кабеля, рекультивации земель, нарушенных при строительстве ВОЛС, и др.

Способ прокладки ОК (бестраншейный или в заранее открытую траншею) во многом зависит от местности, характера грунтов и определяется проектом и ППР на конкретное строительство.

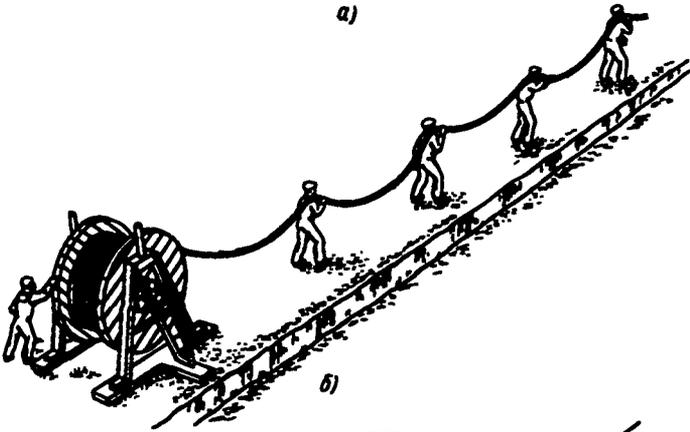
Прокладка ОК в траншею. Технологический процесс при прокладке ОК в открытую траншею практически совпадает с процессом прокладки традиционных кабелей. Осуществляется он теми же техническими средствами. Если позволяют условия трассы, то размотку ОК удобно производить с барабана, установленного в специально оборудованном кузове автомобиля, передвигающегося вдоль трассы (рис. 10.8, а). При этом должен выдерживаться следующий режим прокладки:

Скорость движения автомобиля, км/ч	≤ 1
Минимальное расстояние от оси колес до края траншеи, 1,25 глубины не менее	траншеи
Минимальный радиус изгиба ОК, не менее	20 диаметров ОК
Температура окружающего воздуха, °С, не ниже	-10
Размеры траншей, м:	
минимальная ширина на верху	0,3
минимальная ширина на дне	0,1
глубина	0,8 . . . 1,2

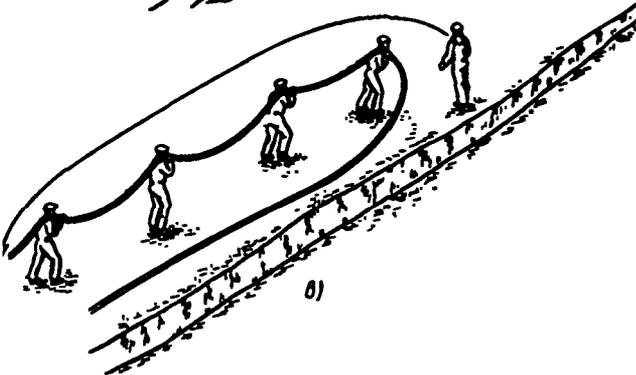
Если рельеф местности не позволяет использовать технику, прокладку производят путем выноски вручную прокладываемой длины ОК вдоль траншеи (рис. 10.8, б), выкладывая кабель на бровку грунта и затем постепенным опусканием его на дно подготовленной траншеи. Такой способ требует привлечения большого числа персонала, который должен обеспечивать правильное обращение с ОК во время всего цикла прокладки (выдерживать допустимые пределы растяжения ОК, его изгибов, закручивания и истирания оболочки). Кроме того, при таком способе прокладки возникают организованные трудности по управлению персоналом на трассе большой протяженности, проходящей по пересеченной местности, охране в течение дли-



a)



b)



в)

Рис. 10.8. Прокладка ОК в траншею с бортовой машины (а) путем выноса всей длины кабеля (б) и способом «петли» (в)

тельного времени раскопанной траншеи и предохранению ОК от возможных повреждений.

При недостаточном числе рабочих прокладку ОК производят способом «петли». При этом конец ОК оставляют у барабана, а размотку ведут с верха барабана, перебирая руками петлю кабеля, нижнюю часть которой по мере продвижения рабочих укладывают непосредственно в траншею или на ее бровку. По мере выкладки нижней части петли освобождающиеся рабочие переходят к барабану и подхватывают новый участок ОК (рис. 10.8, в). При этом расстояние между соседними рабочими должно быть таким, чтобы ОК при прокладке не волочился по земле. Барабан при сматывании ОК должен вращаться равномерно и принудительно (рабочим). После укладки ОК на дно траншеи производится фиксация его трассы в рабочих чертежах и засыпка траншеи специальными траншеезасыпщиками, бульдозерами или вручную.

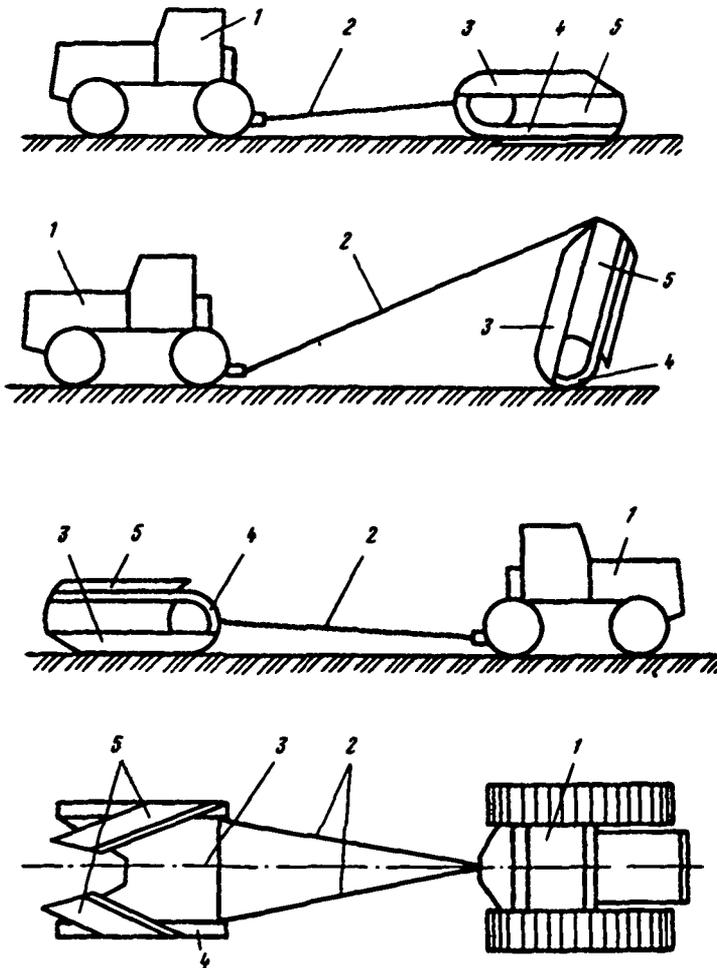


Рис. 10.9. Схема траншеезасыпщика:

1 — трактор; 2 — стальные канаты; 3 — рама; 4 — полость; 5 — лемехи

На рис. 10.9 показан специальный траншеезасыпщик, предназначенный для засыпки траншей, разравнивания и уплотнения грунта после прокладки кабеля ножевыми кабелеукладчиками при работе в тяжелых грунтовых условиях с включением большого количества растительных остатков, валунов и т. д. Траншеезасыпщик представляет собой раму с двумя разнесенными по длине лемехами, закрепленными под постоянным углом. За счет увеличения прочности конструкции и применения закругленных полозьев траншеезасыпщик можно использовать в тяжелых грунтовых условиях. Сцепка с тяговым трактором осуществляется через шарнирное дышло или стальными канатами.

При работе траншеезасыпщик движется вдоль оси траншей, производя сгребание грунта лемехами к середине траншеи и образуя валик грунта. Разравнивание образовавшегося валика грунта и его уплотнение производятся при положении траншеезасыпщика лемехами вверх. Переворачивание его в это положение может осуществляться тягой трактора путем перецепки тягового каната (как показано на схеме), т. е. без применения грузоподъемного механизма.

Периодическое обслуживание механизма состоит из его очистки и внешнего осмотра. Транспортировка осуществляется любым видом автомобиля.

Конструкция траншеезасыпщика позволяет изготовлять его в условиях единичного и мелкосерийного производства с применением универсального станочного и сварочного оборудования. Технические данные опытных образцов траншеезасыпщика, изготовленных трестом «Межгорсвязьстрой»: тип — прицепной, тягач — трактор тягового класса 10 т и более, ширина захвата грунта 1900 мм, габаритные размеры 6050×2300×1110 мм, масса 1899 кг.

Прокладка бестраншейным способом. Более производительным и прогрессивным является способ бестраншейной прокладки с помощью кабелеукладчиков. В этом случае ОК прокладывают непосредственно на дне узкой щели, прорезаемой в грунте ножом кабелеукладчика, снабженным кассетой для направления, подачи и укладки кабеля на заданную глубину залегания (0,9...1,2 м). При этом кабель на пути от барабана до выхода из кабелеуправляющей кассеты подвергается различным механическим воздействиям, которые в зависимости от категории грунта, скоростных режимов прокладки, конструкции ОК и кабелеукладчика могут изменяться в значительных пре-

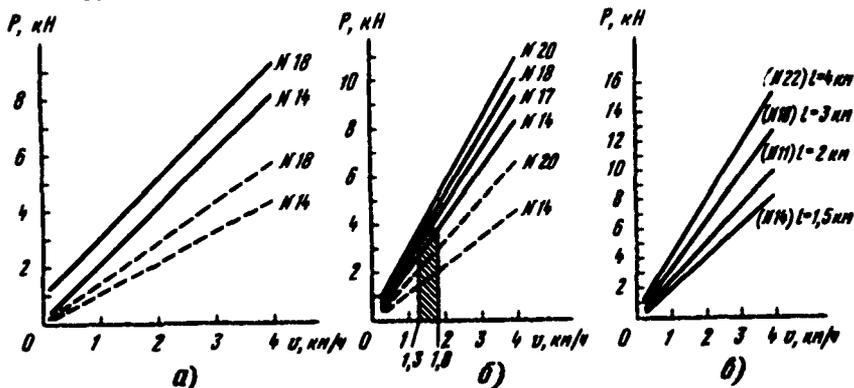


Рис. 10.10. Зависимость натяжения ОК разных конструкций от скорости механизированной прокладки кабелеукладчиком:

а — КУК-3М для ОК длиной 2 км, намотанного на барабаны разных размеров; б — то же, КНВ; в — КУ-120 для различных строительных длин ОК; — кабель ОЗКГ-1; - - - - кабель ОК-50-2 с металлической оплеткой и центральным силовым элементом в виде троса в полиэтиленовом шланге; ////// — область предельных скоростей прокладки ОК

делах, превышая в некоторых случаях предельно допустимое растягивающее усилие на ОК.

На рис. 10.10 приведены зависимости величины натяжения ОК на выходе из кассеты кабелеукладчика от скорости прокладки кабеля, диаметра кабельных барабанов, строительной длины и типа кабеля. Зависимости рассчитывались на ЭВМ по формуле

$$P = \left(\frac{I}{R} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{\mu G_0 r_{\alpha}}{R} \right) e^{f\alpha} \eta_p^{-1},$$

где I — момент инерции барабана с ОК относительно его оси вращения; R — радиус слоя ОК на барабане, с которого происходит его размотка; $d^2\varphi/dt^2$ — вторая производная от угла поворота барабана по времени (ускорение); μ — момент трения цапфы оси барабана в опорах; G_0 — масса барабана; r_{α} — радиус цапфы оси барабана; f — коэффициент трения ОК о заднюю стенку (крышку) кассеты; α — угол изгиба ОК в кассете; η_p — КПД направляющего ролика в кассете.

При расчетах принималось, что натяжение будет наибольшим при $d^2\varphi/dt^2 = v\omega/R$. Зависимости рассчитывались для кабелей типа ОЗКГ-1 с погонной жесткостью 1 470 000 Н/м и типа ОК-50-2 с металлической оплеткой и центральным силовым элементом в виде стального троса в полиэтиленовом шланге с погонной жесткостью 735 000 Н/м. Параметры погонной жесткости определены экспериментально. Одновременно было установлено, что обрыв отдельных ОВ в кабеле ОК-50-2 наступал при растягивающих воздействиях на ОК порядка 2450 Н; при росте нагрузки на ОК от 0 до 2950 Н затухание отдельных ОВ возрастало на 35% (с 11,3 до 15,3 дБ), а при снятии растягивающего воздействия затухание во всех уцелевших ОВ возвращалось к исходным значениям.

Обработка расчетных данных показывает: для всех типов обычных кабелеукладчиков максимальная техническая скорость прокладки 3,3 км/ч не может быть реализована; качественная прокладка ОК без повреждений может обеспечиваться лишь при ограничении скоростей до величин, приведенных в табл. 10.3; натяжение ОК возрастает с увеличением строительной дли-

Таблица 10.3

Характеристика	Тип кабелеукладчика					
	КУК-3М	ЛПК-20-2	КУ-1203	КУК-4	КУК-5М	КУК-6
Оптимальная скорость прокладки ОК, км/ч	1,35	1,4	1,4	1,2	0,9	0,9
Устанавливаемые барабаны:						
количество, шт.	2(4)	2(4)	2	4(2)	4(2)	2
номера барабанов	17(18)	17(18)	18	18(22)	18(26)	20
Число одновременно прокладываемых ОК	4	1—2	1—2	1—4	1—4	1—2
Количество обслуживающего персонала, чел.	3—5	2	1—3	3—5	3—5	2

ны кабеля (см. рис. 10.10, а) (увеличение строительной длины кабеля ОЗКГ-1 в 2 раза при разных скоростях прокладки может дать прирост натяжения в 1,5 раза); с увеличением жесткости кабеля при прочих равных условиях натяжение ОК увеличивается (см. рис. 10.10); натяжение ОК также увеличивается с увеличением размера кабельного барабана. Указанные закономерности должны учитываться при выборе режимов прокладки ОК различными типами кабелеукладчиков.

Особенности оборудования для бестраншейной прокладки ОК в грунт. Критичность большинства ОК к растягивающим усилиям и большие строительные длины ОК определяют следующие особенности технологического процесса его прокладки: кабель должен выдерживать допустимый радиус изгиба на всем участке подачи — от барабана до укладки на дно щели; кассета кабелеукладчика должна быть разборной, чтобы позволять освобождать ОК без его разрезания при подходе к местам, где механизированная прокладка невозможна (например, под дорогами); необходимы приспособления, ограничивающие боковые давления на ОК при прокладке и исключающие засорение кассеты; должно быть обеспечено принудительное вращение барабана в момент начала движения кабелеукладчика.

Эти требования на сегодняшний день реализованы в навесном кабелеукладчике с виброустановкой КНВ-1К (рис. 10.11, а), имеющем следующие технические данные:

Средняя скорость прокладки, км/ч, в режиме:	
активном	. 0,4
пассивном	. 1,5
Глубина прокладки, м	. 0,9... 1,2
Масса барабана с ОК, кг	. 4000
Количество обслуживающего персонала, чел.	. 2
Ширина кассеты, см	. 12
Габаритные размеры, м:	
длина	. 9,2
ширина	. 3,7
высота	. 3,1

Наряду с этим имеется положительный опыт прокладки ОК и другими типами кабелеукладчиков при условии обеспечения выполнения вышеперечисленных требований. Это достигается дооборудованием традиционных кабелеукладчиков специальной кассетой (рис. 10.11, б, в) со специальными направляющими роликами для обеспечения минимально допустимого радиуса изгиба ОК.

Кабеленаправляющая кассета соединена с ножом через две шарнирные тяги, имеет криволинейную поверхность по всей длине и в точках выхода ОК, а также входной растроб с округлением по контуру, высота которого над уровнем грунта составляет не менее 800 мм. Кассета обеспечивает необходимый радиус изгиба, ОК проходит в ней, опираясь на ролики, выполненные попарно на балансирах, позволяющих перемещать ролики в направлении, перпендикулярном оси опирающегося на него ОК.

Ролики размещены в кассете таким образом, что максимально уменьшают радиальное давление на ОК. Они ставятся в точках траектории ОК, где величина поперечных сил на ОК имеет большую величину. В кассете такой конструкции поперечные силы на входе и выходе примерно вдвое меньше по сравнению с кассетой, имеющей обычную конструкцию.

Кабель в такую кассету поступает в ее верхнюю часть и, проходя по системе направляющих роликов, выходит в грунт из нижней части через направляющую трубу. При этом необходимо обеспечивать принудительную, но свободную, без рывков, размотку ОК с барабана и его подачу в кассету. Для избежания рывков при размотке необходимо устранить боковое соскальзывание барабана при помощи установки на оси барабана боковых зажимных втулок. Зазор между осью и центральным отверстием в барабане не должен превышать 2... 3 мм.

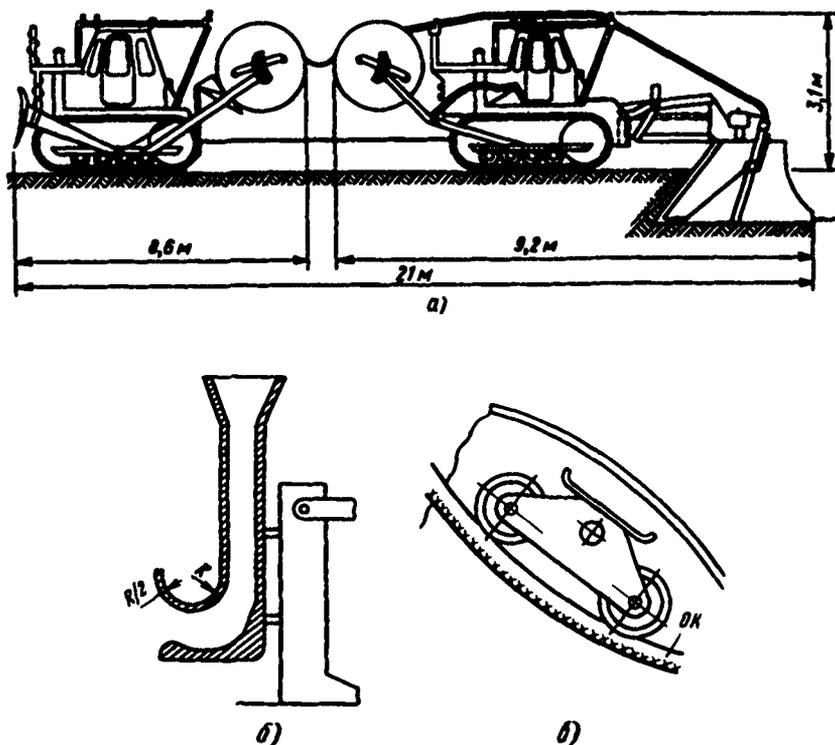


Рис. 10.11. Кабелеукладчик КНВ-1К:

а — общий вид; б — конструкции пропорочного и кабелеукладывающего ножей; в — направляющие ролики

Наряду с этими мероприятиями необходимо выбирать оптимальные скоростные режимы прокладки (см. табл. 10.3).

В грунтах 3—4 категории, а также с включением камней свыше 30% прокладка ОК должна осуществляться с предварительной пропоркой грунта на всю глубину прокладки; перед прокладкой обязательно с помощью бульдозера должна производиться планировка грунта на будущей трассе прокладки. Подъем и уклоны трассы не должны превышать 30 градусов.

Концы ОК в месте стыка смежных строительных длин должны иметь запас, необходимый для монтажа муфты в монтажно-измерительной лаборатории и последующей выкладки вместе с муфтой. В среднем нахлест кабеля должен составлять по 8...10 м с каждой строительной длины.

Прокладка ОК на переходах через препятствия. При прокладке больших строительных длин внутризоновых и магистральных ОК бестраншейным способом возникают определенные трудности из-за наличия пересечений на трассе. Известно несколько способов преодоления пересечений без разрезания ОК.

1-й способ. При подходе кабелеукладчика к трубопроводу ОК разматывают с барабана, выкладывают его «восьмеркой» и пропускают под препятствием (в заготовленную трубу) и затем снова наматывают на барабан и продолжают прокладку. При коротких длинах оставшийся ОК можно прокладывать с земли, не наматывая его снова на барабан.

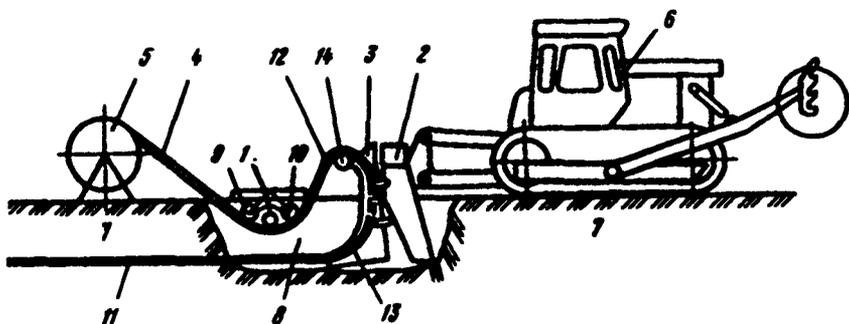


Рис 10 12 Прокладка ОК через препятствия

1 — препятствие по трассе 2 — нож кабелеукладчика, 3 — разборная кассета, 4 — ОК, 5 — барабан с ОК, 6 — кабелеукладчик, 7 — трасса прокладки, 8 — котлован под препятствием, 9, 10 — ролики, 11 — проложенный ОК, 12 — ОК на раскатных роликах, 13 — петля ОК, 14 — направляющий узел кассеты

2-й способ (рис. 10 12) При достижении кабелеукладчиком на трассе препятствия под последним отрывают котлован Барабан с ОК снимают с кабелеукладчика и, освободив ОК из разборной кассеты, устанавливают на козлы перед препятствием. Кабелеукладчик перегоняют за препятствие. Опускают нож с кассетой в котлован за препятствием и заправляют в кассету ОК, протянутый петлей под препятствием. Для предохранения кабеля от перегибов под препятствием устанавливают кабельное колено или ролики. При нескольких препятствиях эту операцию повторяют.

Для предохранения от повреждения ОК при его волочении по поверхности грунта по трассе устанавливают раскатные ролики. Кроме того, необходимо привлечение дополнительного персонала для ручной разматки ОК с барабана и вспомогательной подтяжки кабеля в середине трассы проходящего по поверхности ОК.

Трудозатраты при прокладке ОК в грунт. Работы по прокладке оптического кабеля вручную в готовую траншею выполняют бригадой, в состав которой входят по одному монтажнику связи — кабельщику 6- и 3-го разряда, два машиниста 6-го и один 4-го разряда.

Работы по прокладке оптического кабеля кабелеукладчиком КНВ-1К выполняют бригадой, в состав которой входят по одному монтажнику связи — кабельщику 6- и 3-го разряда, два машиниста 6-го и один 4-го разряда.

Трудоемкость выполнения основных работ на 1 км трассы приводится в табл 10 4

Таблица 10 4

Вид работы	Трудоемкость работ на трассе сложности			
	средней (ровная среднехолмистая, грунт I и II группы)		тяжелой (заболоченная, сильнохолмистая, грунт III группы)	
	Машинисты, чел/ч	Монтажники связи—кабельщики, чел/ч	Машинисты, чел/ч	Монтажники связи—кабельщики, чел/ч
Прокладка кабеля на глубину 1,0. 1,2 м в открытую траншею	24,0	18	32	24
Прокладка кабеля кабелеукладчиком	40	27	58	29

10.5. Прокладка ОК в телефонной канализации

10.5.1. Особенности прокладки ОК в канализации

Волоконно-оптические линии связи, проходящие в черте населенных пунктов, как правило, прокладывают в телефонной канализации. Основу составляют трубы круглого сечения диаметром 100 мм - асбоцементные, бетонные или пластмассовые.

Телефонную канализацию прокладывают на глубине 0,4 - 1,5 м отдельными блоками, герметично состыкованными между собой. Через 80 - 150 м по трассе телефонной канализации размещают смотровые устройства - телефонные колодцы. По стенкам колодцев имеются особые консоли, на которых укладывают кабели, а в местах стыка двух строительных длин - кабельные муфты.

Отличие технологии прокладки в телефонной канализации оптических и традиционных кабелей заключается в том, что усилие тяжения ОК при прокладке не должно превышать допустимого растягивающего усилия, а также не допускается кручение кабеля. При этом тяжение должно осуществляться одновременно за оболочку и армирующие элементы ОК.

Прокладка ОК в телефонной канализации производится, как правило, в свободные каналы диаметром 100 мм или в субканалы, образованные предварительно затянутыми в основной канал полиэтиленовыми трубами с внутренним диаметром 32 мм. Наиболее часто применяются трубы из полиэтилена низкого давления ПНД-32, изготавливаемые по ГОСТ 18599-83. В свободный канал диаметром 100 мм одновременно может быть затянуто три-четыре субканала.

По окончании изложенных подготовительных работ проводят группирование строительных длин ОК, составляют укладочную ведомость и записывают в нее по порядку прохождения трассы номера смотровых устройств, через которые прокладывают конкретные строительные длины ОК. В соответствии с укладочной ведомостью и проектом, в котором указаны каналы, отведенные под прокладку ОК, производят подготовку трассы прокладки, устраивая ограждения по трассе, подготавливают колодцы и заготавливают каналы.

10.5.2. Заготовка каналов кабельной канализации

Заготовка субканалов с помощью стеклопластикового прутка. Устройство заготовки каналов (УЗК) представляет собой кассету, на которую намотан упругий стеклопластиковый пруток длиной 150 м и диаметром 11 мм с комплектом оснастки для прутка наконечниками различных типов и соединителей (рис 10.13, а).

С установленного у телефонного колодца УЗК пруток сматывают, подают через люк в колодец и вводят (проталкивают) в канал. После того как конец прутка с наконечником выйдет из канала в смежный колодец, к наконечнику прутка прикрепляют проволоку или трос, которые втягивают в канал прутком при выемке его из смежного колодца. В некоторых случаях возможно затягивание в канал сразу и ОК при помощи прутка, оснащенного на конце специальным наконечником с петлей. При этом к наконечнику с компенсатором кручения прикрепляют тросик кабельного чулка, надетого на конец протягиваемого кабеля. Устройство заготовки каналов имеет колеса для передвижения по трассе кабельной канализации, его габаритные размеры 1000×500×1125 мм и масса вместе с прутком составляет 52 кг. Устройство предназначено для эксплуатации на открытом воздухе при температуре -40 - 40°С.

Стеклопластиковый пруток, изготовленный из ровинга стеклянных нитей и связывающего компонента на основе эпоксидной смолы, имеет полиэтиленовое покрытие, нанесенное на сердечник методом экструзии. Разрушающее напряжение при растяжении прутка не менее 600 МПа, а гибкость прутка позволяет скручивать его в бухту с наружным диаметром 1,2 м.

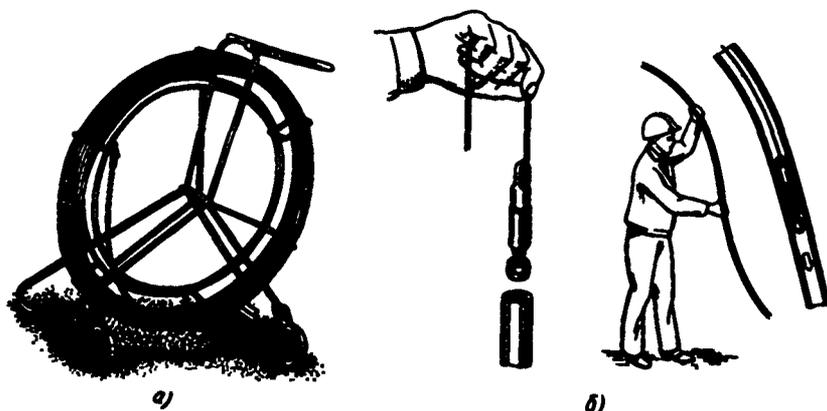


Рис 10.13 Заготовка субканала с помощью
а — УЗК, б — полиэтиленовой трубы

Опыт применения стеклопластикового прутка показал его значительные преимущества при соблюдении следующих условий

длина прутка должна быть не менее расстояния между наиболее удаленными колодцами на трассе,

пруток от первого колодца должен быть настолько далеко введен в канал (хотя бы и через два колодца), чтобы он полностью сошел с барабана кассеты,

конец прутка следует соединять непосредственно с тросом тяговой лебедки и протаскивать через все каналы и колодцы транзитом до конечного колодца

Заготовка полиэтиленовой трубы до затягивания ее в канал. На рис 10.13, б показан принцип заготовки субканала из отрезка полиэтиленовой трубы, не затянутой в телефонную канализацию. Металлический грузик (шар или цилиндр), привязанный к шнуру, опускают с одного конца в полиэтиленовую трубу. Затем, приподняв трубу, перемещают в ней грузик. После того как шнур будет протянут на всю длину трубы, его конец привязывают к концу линейной проволоки, которую затем затягивают в трубу. Далее трубу обычным способом протягивают в канал телефонной канализации.

Пневмозаготовка каналов. Этот способ наиболее эффективен при заготовке длинных пролетов между колодцами. Он заключается в «продувании» внутрь заготавливаемой трубы специального снаряда в виде парашюта, на который оказывает давление струя воздуха под давлением нескольких атмосфер. Этот парашют при движении под давлением пневмоструи тянет за собой прикрепленный к нему заготовочный трос. В состав комплекта устройств для ручной прокладки ОК в каналы из полиэтиленовых труб входит пневмоустройство для заготовки каналов КПЗК-25, работа которого основана на вышеописанном принципе.

10.5.3. Растягивающие усилия, действующие на ОК при прокладке в телефонной канализации

При тяжении ОК за один конец растягивающие усилия, действующие на кабель, не должны превышать предельно допустимых значений, установленных в технических условиях на прокладываемый кабель. При прокладке ОК в прямолинейной телефонной канализации необходимое тяговое усилие T_n оценивают по формуле $T_n = Pfl$, где P — масса единицы длины кабеля, кг/м, f — коэффициент трения; l — длина кабеля, м.

Коэффициент трения зависит от материала труб телефонной канализации и по экспериментальным данным для полиэтилена равен 0,17...0,3, для полихлорвинила 0,16...0,36 и для асбоцемента 0,24...0,38.

В табл. 10.5 приведены расчетные величины предельной длины ОК, которую можно затягивать в канал путем тяжения за один конец. Из таблицы видно, что при допустимом для городских ОК тяговом усилии 1200 Н возможность протягивания за один конец ОК строительной длиной 2,2 км обеспечивается не во всех случаях

Таблица 10.5

Масса ОК, кг/км	Предельная длина ОК в полиэтиленовой оболочке для затягивания в каналы, м					
	бетонные		асбоцементные		полиэтиленовые	
	с допустимым тяговым усилием, Н					
	600	1200	600	1200	600	1200
80	1975	3950	2340	4680	2950	5180
160	975	1075	1170	2350	1300	2600
240	660	1320	780	1560	860	1720

Если трасса прокладки имеет подъемы и изгибы, то растягивающие ОК усилия возрастают. При подъеме трассы на угол α увеличение тягового усилия можно оценить по формуле $T_{\alpha} = T_n (f \cos \alpha + \sin \alpha)$.

Увеличение тягового усилия при изгибе трассы на угол φ может быть определено по формуле $T_{\varphi} \approx T_n \exp(\varphi)$.

Боковое давление на ОК при изгибе трассы рассчитывают для участка с наименьшим радиусом изгиба R_{\min} по формуле $P = T_{\varphi} / R_{\min}$.

На рис. 10.14 приведены графики, рассчитанные по приведенным формулам для различных значений угла подъема и угла изгиба трассы. Из графика видно, что, например, при величине $f=0,5$ и угле поворота трассы $\varphi=90^\circ$

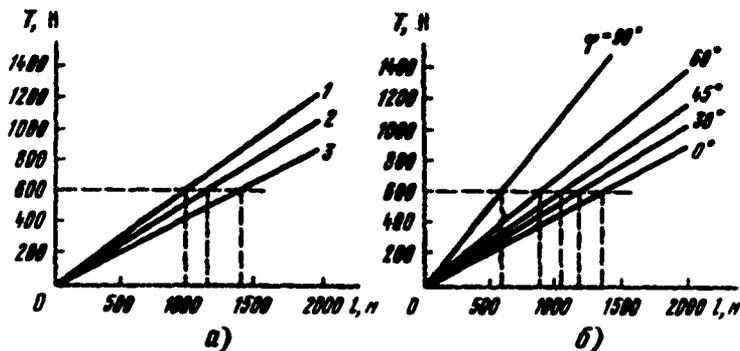


Рис. 10.14. Зависимость тягового усилия от длины ОК при различных материалах канализации (а) и угле ее изгиба (б)

1 — бетонная, 2 — асбоцементная; 3 — полиэтиленовая

тяговое усилие на ОК возрастает примерно в 2,2 раза по сравнению с тяговым усилием на прямолинейном участке трассы. Поэтому при крутых изгибах трассы необходимо пользоваться приспособлениями, обеспечивающими минимальный коэффициент трения и бокового давления на ОК (поворотные и направляющие устройства, ролики воронки и др.).

Наличие на реальных трассах многочисленных отклонений от прямолинейности приводит к тому, что протяжка строительной длины ОК за один конец без превышения допустимого растягивающего усилия становится невозможной. Поэтому необходимо рассредотачивать тяговые усилия по длине ОК, что позволит уменьшить значение тяговых усилий для каждого участка кабеля. Для этого при механизированной прокладке по трассе составляют специальные промежуточные лебедки с автономными двигателями и системой слежения за тяговым усилием ОК. При определенной величине растягивающего усилия на ОК включается двигатель лебедки, приводящий в действие механизм тяжения кабеля. Основной деталью этого механизма являются вращающиеся прижимные резиновые фрикционы, прижимающиеся к ОК и продавливающие его. При этом действующее на ОК тяговое усилие T_n и давление на него фрикционов лебедки связаны следующей зависимостью:

$$T_n = f_1 P_1,$$

где T_n — тяговое усилие, создаваемое лебедкой и приложенное к ОК; f_1 — коэффициент трения между ОК и фрикционами лебедки; P_1 — давление фрикционов на ОК, Н.

При максимальном тяговом усилии $T = 3000$ Н и коэффициенте трения $f_1 = 0,85$

$$P_1 = T/f_1 = 3000/0,85 \approx 3500.$$

По техническим условиям на ОК стойкость к раздавливающим усилиям на современные кабели составляет 1000 Н на 1 см длины кабеля. С учетом этого длина участка соприкосновения протягиваемого ОК и тянущих фрикционов должна быть не менее 3,5 см.

В некоторых случаях возникает необходимость прокладки ОК в каналы, занятые другими кабелями. Часто это значительно удешевляет строительство, а иногда является единственной возможностью его осуществления. При этом возникает опасность повреждения ОК при их затяжке в результате защемления, а также во время проведения ремонтных работ на ранее проложенных соседних кабелях.

Фирмой Bell были проведены специальные исследования по определению ожидаемых величин растягивающих усилий на ОК, протягиваемый в канал с предварительно проложенным кабелем с медными жилами. Расчеты и эксперименты проводились для случая прокладки ОК диаметром 1 дюйм (25,4 мм) в полихлорвиниловой трубе с внутренним диаметром 4 дюйма (101,6 мм), занятой кабелем диаметром 2 дюйма (50,8 мм) с металлическими жилами. Расчеты показали, что растягивающее усилие на ОК возрастает на криволинейных участках трассы и уменьшается в случае, когда ранее проложенный кабель размещается в нижней части канала. Тяговое усилие уменьшается также с увеличением диаметра ОК ($D_{ок} > 28$ мм). Это позволяло сде-

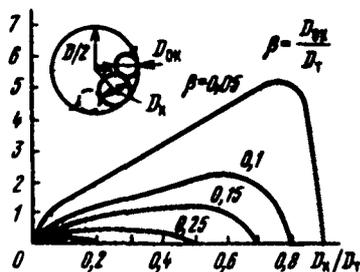


Рис. 10.15. Степень увеличения тягового усилия при прокладке ОК в занятом канале

дать вывод, что при разумно выбранных длинах прокладываемого ОК можно избежать превышения допустимой силы натяжения для данного типа ОК (рис. 10 15).

Минимальные значения растягивающих ОК усилий устанавливаются при соблюдении соотношения

$$D_r - D_k - 2D_{ок} = 0,$$

где D_r — диаметр трубы канала, D_k — диаметр ранее проложенного кабеля; $D_{ок}$ — диаметр вновь прокладываемого оптического кабеля

10.5.4. Механизмы и приспособления для прокладки ОК

Для прокладки ОК в телефонную канализацию разработан ряд механизмов и приспособлений, повышающих производительность работ и обеспечивающих бездефектную затяжку ОК. Некоторые из них различные направляющие приспособления, кабельные наконечники, устройства для заготовки каналов — приведены на рис 10 16—10 21

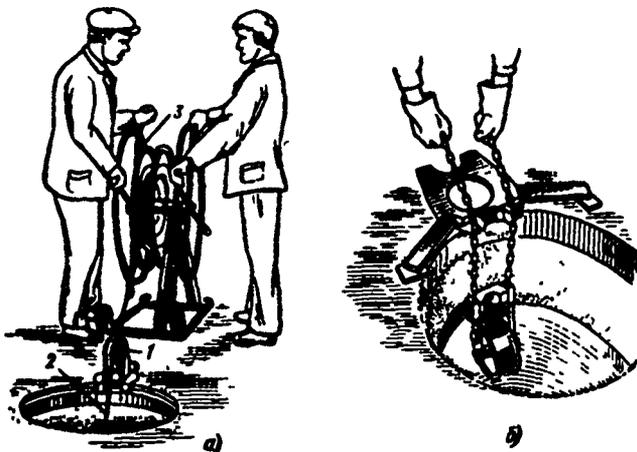


Рис 10 16 Ролики люкоогибные.

а — верхний ролик для обхода верхней кромки колодца, *б* — подвесной нижний ролик для направления заготовочной проволоки через нижнюю кромку горловины колодца
1 — ролик, *2* — заготовочная проволока, *3* — лебедка ручная проволочная ЛПР

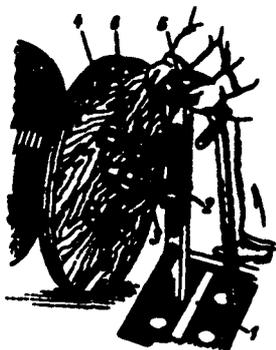


Рис 10 17. Устройство для размотки кабеля

1 — две сварные опоры, *2* — каретки для удержания оси барабана с кабелем, *3* — ось барабана, *4* — барабан с кабелем, *5* — маховичок для подъема барабана с земли, *6* — подвижные конуса для ввода и фиксации на оси барабана

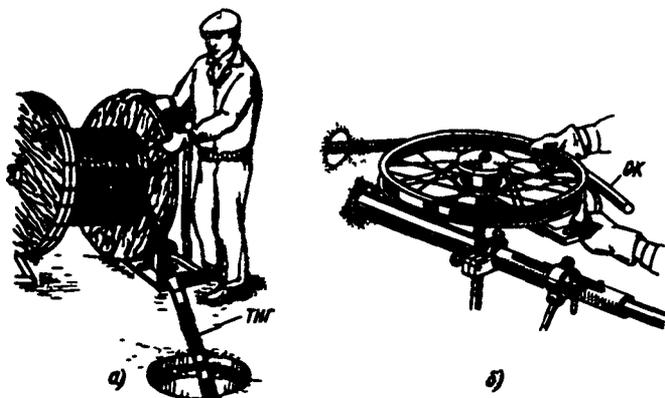


Рис. 10.18 Устройство для плавного изменения направления тяжения ОК-
 а — труба направляющая гибкая (ТНГ) для ввода ОК в обход горловины колодца.
 б — блок кабельный

Рассмотрим комплект, применяемый для телефонной канализации из труб диаметром 100 мм при строительстве ВОЛС

В состав комплекта входят следующие устройства и приспособления: лебедка ручная проволочная (ЛПР) для заготовки каналов с помощью проволоки диаметром 3 мм, затягивания кабелей ГТС, а также для затягивания каната тяговой лебедки перед прокладкой кабелей междугородной связи при вводе в ОП (рис 10.16, а),

устройство для размотки кабеля с барабанов (УРКР) (рис 10.17),
 труба направляющая для ввода через горловину колодца кабеля от барабана до канала кабельной канализации (ТНГ) (рис 10.18, а),

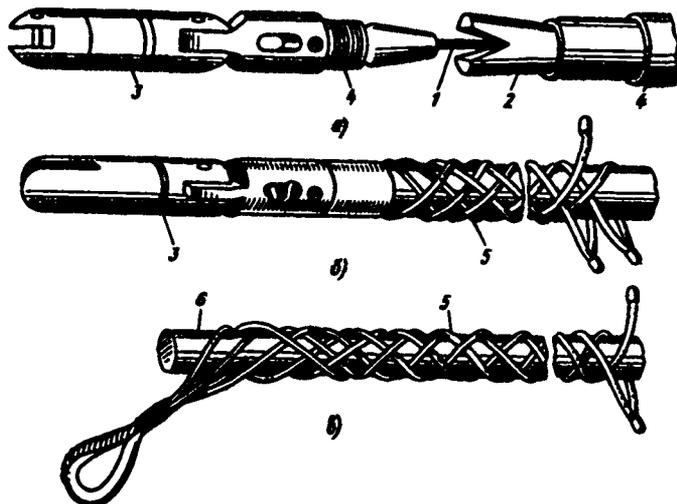


Рис. 10.19. Кабельный наконечник для одновременного тяжения за армирующий элемент и оболочку ОК (а) и кабельный наконечник с компенсатором кручения в чулкем (б).

1 — армирующий элемент, 2 — оболочка кабеля, 3 — компенсатор кручения, 4 — резьбовой соединитель, 5 — кабельный чулок, 6 — ОК

ролики люкоогибные (РЛО) для направления прохождения заготовочной проволоки (тягового каната) через горловину колодца (рис. 10.16, б);

горизонтальная распорка внутренняя (РГВ) и блок поворотный кабельный (БПК) для плавного поворота прокладываемого кабеля в угловом колодце (рис. 10.18);

воронка канальная направляющая ВКН-100 для предотвращения повреждений кабеля и обеспечения требуемого радиуса изгиба на входе и выходе канала кабельной канализации;

чулок кабельный съемный ЧСК-12;

наконечник кабельный с чулком для тяжения кабеля за центральный силовой элемент и полиэтиленовую оболочку НСК. На рис. 10.19 приведены наконечники для оснастки оптических кабелей разных конструкций, обеспечивающие их тяжение одновременно за оболочку и армирующие элементы, исключаящие закручивание ОК во время прокладки;

компенсатор кручения (ККР) для исключения передачи на кабель скручивающих усилий.

Опорные устройства УРКР имеют по два колеса для перемещения их вручную по трассе прокладки кабеля. Перед выездом на объект проверяют отсутствие загрязнений грузового винта, свободное передвижение каретки при вращении маховичка и фиксацию конусов на оси. Опорные устройства устанавливают так, чтобы каретки находились на противоположной стороне от люка колодца. Расстояние между опорными устройствами должно составлять 800 мм. Барабан с кабелем устанавливают так, чтобы смотка кабеля шла сверху. В отверстие барабана вводят ось и фиксируют ее конусами с зажимами. Барабан с устройством размотки устанавливают в начале трассы, как показано на рис. 10.20. Вращением маховичков опускают каретки на 20...30 мм ниже шпек оси барабана. Заводят ось так, чтобы ее шейки находились над гнездами кареток. Вращением маховичков поднимают барабан, устанавливают необходимую высоту и горизонтальность положения барабана с кабелем. Барабан должен свободно, от руки, вращаться на конусах оси.

Заготовочную проволоку или трос, выходящий из канала кабельной канализации, пропускают через люкоогибные ролики и соединяют с наконечником ОК, прошедшим через направляющую трубу ТНГ.

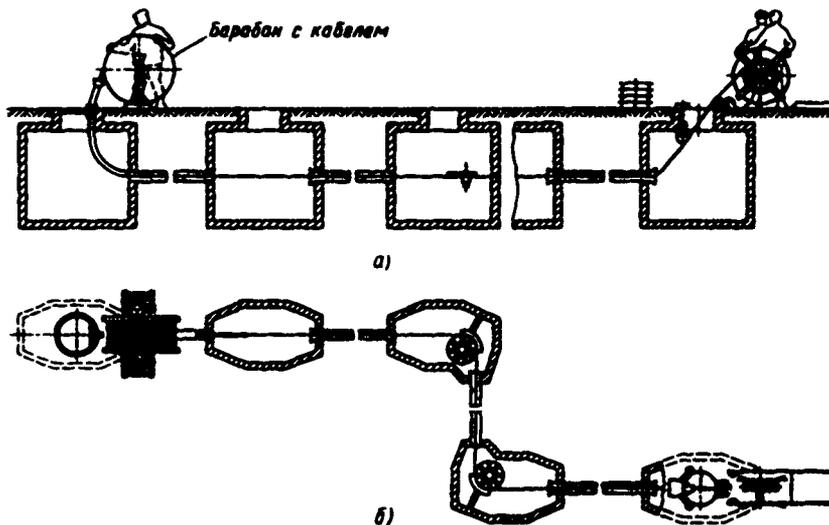


Рис. 10.20. Протяжка оптического кабеля в канализации:

а — вид сбоку; б — вид сверху:

Устройство для ввода ОК через горловину колодца от барабана до канала кабельной канализации имеет набор полиэтиленовых гибких гофрированных труб длиной 3 .. 5 м с металлической воронкой на верхнем конце для ввода ОК (см. рис 10 18, а) и круглую раму с зажимом для фиксации гибкой полиэтиленовой трубы

Верхний (рис 10 16, а) и нижний (рис 10 16, б) ролики люкоогибные служат для направления заготовочной проволоки или тягового каната РЛО для направления и беспрепятственного прохождения заготовочной проволоки в обход соответственно верхней и нижней кромок горловины колодца Перед работой проверяют свободное вращение роликов и отсутствие повреждений на крепёжной цепи

Направляющую трубу устанавливают на входе ОК с барабана в колодец кабельной канализации При этом выбирают направляющую трубу, длина которой соответствует расстоянию от люка колодца до канала В нижний конец трубы вводят предварительно вытянутую из канала заготовочную проволоку, прикрепленную к кабельному наконечнику Трубу вводят затем в занимаемый канал по плавной траектории

Для предотвращения повреждения кабеля и обеспечения требуемого радиуса изгиба на входе и выходе канала кабельной канализации применяют полиэтиленовые воронки, устанавливаемые в транзитных колодцах Размер воронки определяется типом канализации (рис 10 21)

Блок кабельный БЛК служит для плавного поворота ОК и устанавливается в угловых колодцах на специальной распорке (см рис 10 18, б) Блок, по которому направляется ОК, устанавливают на 2 .. 3 см выше трассы прокладываемого кабеля Возможна наклонная установка блока при переходе на другой уровень трассы, угол наклона не должен превышать 10 градусов

На другом конце трассы заготовочную проволоку (или трос) с прикрепленным к ней ОК вытягивают с помощью лебедки Лебедка ручная проволочная ЛПР состоит из рамы, на которой крепится вал с зубчатой полумуфтой, двух штурвалов с рукоятками для создания тягового усилия, катушки для намотки проволоки или троса, зубчатой полумуфты для ограничения тягового усилия, двух колес и двух крюков для перемещения вручную по трассе прокладки кабеля (рис 10 16, а)

Перед выездом на трассу проверяют и при необходимости регулируют тяговое усилие лебедки, которое по показаниям динамометра не должно превышать 1200 Н

На трассе лебедку устанавливают на расстоянии примерно 2 м от люка выходного колодца с противоположной стороны от выходного канала Протяжку ОК осуществляют двое рабочих, вращающих штурвалы лебедки Прокладка должна осуществляться плавно, без рывков и без допущения слабину заготовки или ОК, при которой они могут соскочить с направляющих устройств При превышении допустимого тягового усилия, установленного на ограничителе лебедки, ее штурвалы прокручиваются вхолостую без передачи тягового усилия В этом случае необходимо подтянуть ОК в

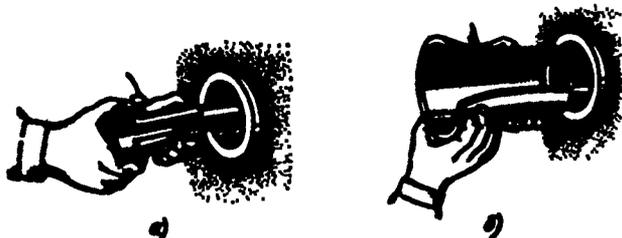


Рис 10 21 Воронки канальные направляющие для субканала диаметром 32 мм (а) и канала диаметром 100 мм (б)

транзитных колодцах, используя служебную радиосвязь. Прокладку ОК следует проводить при температуре не ниже -10°C .

После прокладки ОК и выкладке его в смотровых устройствах ОБ в кабеле просвечивают и, убедившись в их целостности, концы кабеля герметично заделывают до проведения монтажных работ.

Кроме описанных устройств Навлинским заводом «Промсвязь» выпускается более усовершенствованный комплект устройств ОК-2 для прокладки ОК в субканалы из полиэтиленовых труб диаметром 32 мм. Он оснащен специальными устройствами для затяжки в каналы диаметром 100 мм одной или нескольких труб ПНД-32 и приспособлениями для их фиксации в стандартных каналах. В комплект также входят: пневмоустройство КПЗК-25 для заготовки субканалов, предназначенное для введения с помощью сжатого воздуха каната лебедки; более усовершенствованная лебедка ЛУР; тамбур для укладки ОК «восьмеркой» при прокладке его строительной длины в две стороны и другие приспособления. Полный состав комплекта ОК-2 приведен в Приложении 2.

10.5.5. Прокладка ОК в телефонной канализации

Устройство для размотки ОК с кабельного барабана устанавливают в начале трассы у люка входного колодца со стороны входа в канал кабельной канализации. Барабан ставят таким образом, чтобы размотка ОК шла с его верхней части.

На трассе во всех местах, где происходит изменение ее направления от прямолинейного, расставляют направляющие устройства. На рис. 10.18 приведены основные разновидности таких приспособлений.

Перед прокладкой ОК верхний на барабане конец строительной длины, с которого начнется протяжка, должен быть оснащен специальным накопником. Заготовочную проволоку или трос присоединяют к кошу накопника, укрепленного на конце ОК.

При затягивании ОК вручную скорость прокладки может составлять 5...7 м/мин. Процесс затягивания должен осуществляться равномерно, без резких рывков и остановок ОБ, с соблюдением минимально допустимого радиуса изгиба кабеля.

Для обеспечения оперативной связи по трассе рекомендуется использовать переносные радиостанции, например типа «Лен».

После прокладки ОК выкладывают по форме колодцев и укладывают на консоли. Как правило, ОК укладывают в ближайшем по вертикали ряду консолей, в ближнем к кронштейну ручье консолей. В точках поворота ОК можно закрепить с помощью липкой ленты или мягкой проволоки.

После выкладки ОК оптические волокна проверяют на отсутствие обрыва путем их просвечивания и сдают для проведения монтажных работ. До проведения монтажа концы ОК должны быть защищены от механических повреждений и попадания влаги.

Работы по прокладке оптического кабеля ГТС в кабельной канализации выполняются комплексной бригадой в составе: старший инженер — 1, инженер-измеритель — 1, инженер — 1, монтажник связи 6-го разряда — 1, монтажник связи 5-го разряда — 1, монтажник связи 4-го разряда — 2. По данным, полученным при строительстве опытных линий и прокладке кабелей в телефонной канализации, трудозатраты в расчете на 1 км ОК составляют примерно 300 чел.-ч.

10.6. Монтаж оптических кабелей

10.6.1. Особенности монтажа ОК

После прокладки ОК в месте окончания одной строительной длины кабеля к ней присоединяют следующую строительную длину. Для этого непосредственно на трассе в ходе строительства оборудуют рабочее место,

на котором и производится монтаж промежуточных муфт, соединяющих концы смежных строительных длин ОК, а также осуществляется контроль за качеством выполнения монтажных работ.

На линиях с традиционными кабелями в пластмассовых оболочках, скожих по конструкции с защитными покрытиями ОК, в среднем 20% повреждений вызывается нарушением герметичности, обусловленной растрескиванием сварных швов соединительных муфт. Очевидно, что сохранение такой повреждаемости на ВОЛС недопустимо из-за более высокой степени уплотнения таких линий и значительно большей трудоемкости работ по отысканию и устранению повреждений.

Кроме того, необходимо учитывать особенности конструкции оптических кабелей, во многом определяющих технологию монтажа соединительных муфт ОК.

Надежность соединительной муфты определяется состоянием сварных швов, соединяющих отдельные части пластмассовых муфт, швов между муфтой и оболочкой кабеля, а также сростков ОБ и их запаса в муфте. Надежная работа соединительных муфт в большой степени зависит от субъективных факторов, определяемых квалификацией монтажников, технологией строительно-монтажных работ, свойствами применяемых полуфабрикатов, системой контроля за качеством и т. д.

Основные операции при монтаже ОК:

- нахождение на трассе концов сращиваемых ОК;
- осмотр защитных оболочек на доступных участках, а также концов ОК, защищенных от попадания влаги в сердечник ОК;
- установка служебной связи, оборудование рабочего места, предварительная выкладка запаса строительных длин, закрепление сращиваемых концов ОК, удаление защитного покрытия, проверка целостности ОБ;
- сварка ОБ с проведением контроля качества сростков;
- восстановление элементов сердечника, паспортизация;
- восстановление защитных покровов;
- выкладка запаса ОК и муфты в котловане или колодце, маркировка муфт.

К работе допускаются только персонал, прошедший специальное обучение по монтажу и измерениям ОК. В бригаду для монтажа и контрольно-измерительных проверок входят: старший инженер-измеритель, инженер-измеритель, техник-измеритель, монтажник связи — спайщик 6-го разряда, монтажник связи — спайщик 5-го разряда

Число и место расположения муфт по трассе определяются в ППР на строительство. Во всех случаях необходимо принимать меры по исключению возможности появления дополнительных муфт на линии. При этом число комплектов для монтажа муфт, подготавливаемых к началу строительства, должно примерно на 10...15% превосходить число строительных длин ОК.

Монтаж соединительных муфт магистральных и внутризоновых ОК должен проводиться в специально оборудованной монтажно-измерительной лаборатории, а монтаж кабелей ГТС возможен в смотровых устройствах.

Лаборатория для измерения и монтажа оптического кабеля (ЛИОК) представляет собой автомобиль внутриведомственного пользования, состоящий из автомашины ЗИЛ-131, на которой установлен кузов марки КУНГ-1-мд. Внутри кузова установлен монтажный стол, оборудованный приспособлениями для закрепления концов монтируемых ОК, устройства для сварки ОБ, а также монтажные инструменты. Предусмотрены места для развертывания, хранения и транспортировки комплекта измерительных приборов. Электропитание осуществляется от бортовой сети напряжением 12 В или бензоэлектростанции АБ-1 мощностью 1 кВт. Для оперативной связи в процессе монтажа в машине должна быть оборудована радиостанция.

Машину устанавливают по возможности ближе к котловану. Концы ОК, очищенные от грязи, подают в монтажно-измерительную машину, закрепляют их в монтажном станке и разделяют в соответствии с технологическими картами трудовых процессов, разработанными для конкретных типов ОК.

После сварки ОВ, не вынимая сростка из сварочного устройства, производят контроль качества сварки рефлектометром обратного рассеивания, установленным в начале строительной длины кабеля. Затухание места сварки многомодовых ОВ должно быть не более 0,5 дБ; при большем затухании сварку необходимо переделать. Если после двойной переделки затухание все же превышает 0,5 дБ (но не более 0,8 дБ), то сварочное соединение не переделывают. Однако увеличение затухания необходимо скомпенсировать за счет уменьшения затухания на других сростках этого ОВ в следующих муфтах так, чтобы не превысилась суммарная величина затухания, установленная проектом на весь участок. Если затухание сварки превышает 0,8 дБ, необходимо вызвать представителя завода-изготовителя ОК, заказчика и в их присутствии составить акт рекламации.

После сварки ОВ на место сростка устанавливают комплект деталей защиты сростка, производят окончательную выкладку запаса ОВ и закрепление защищенного сростка. После выкладки всех сваренных ОВ производят окончательную проверку затухания оптического сигнала во всех волокнах. В случае положительного результата заполняют и вкладывают паспорт муфты, производят восстановление элементов кабельного сердечника и защитных покровов ОК. Для внутризональных и междугородных линий производят проверку герметичности муфт местным давлением порядка 98 кПа.

10.6.2. Факторы, влияющие на затухание сростков ОВ

В отличие от традиционных кабелей затухание в сростках ОВ может достигать больших величин, соизмеримых с километренным затуханием ОВ, поэтому сращивание ОВ является важнейшей операцией, во многом определяющей качество связи. Трудность сращивания ОВ кабелей связи усугубляется тем, что эти операции почти всегда выполняются в дискомфортных или полевых условиях, что предъявляет определенные требования к выбору метода сращивания. Из известных на сегодняшний день в мировой практике трех способов сращивания ОВ — с помощью разъемных соединителей, методом склеивания на основе цианакрилатных клеев и методом электродуговой сварки — последний получил преимущественное распространение в отечественной практике строительства ВОЛС.

При сращивании методом сварки концы ОВ очищают от защитного покрытия, а затем скалывают волокна таким образом, чтобы отклонение плоскости скола от перпендикулярности к боковой поверхности ОВ было не более одного градуса. Далее концы ОВ юстируют, располагая и фиксируя их соосно в горизонтальной плоскости вблизи источника дугового разряда. Концы ОВ предварительно подогревают, затем соединяют, сваривают и защищают место сростка. Подготовка ОВ и их качественная сварка требуют очень высокой квалификации операторов, специальных инструментов и приспособлений.

Согласно МККТТ дополнительные потери, вносимые сварным сростком, определяются двумя группами факторов. Первая группа определяет затухание, обусловленное такими внешними факторами, как погрешности юстировки (поперечное, продольное и осевое смещение), качество скола и отражение Френеля. Вторая группа обусловлена таким внутренним фактором, как неидеальность сращиваемых ОВ (изменение диаметра сердечника и оболочки ОВ, эллиптичность и концентричность сердечника и оболочки ОВ).

Влияние первой группы факторов, определяемых в основном квалификацией оператора, на затухание сростка показано на рис. 10.22. Исследования

показали, что на затухание сростка большое влияние оказывает поперечное смещение и смещение осей (т. е. погрешности юстировки). Так, поперечное смещение на 0,14 радиуса сердечника (3,5 мкм на 50 мкм сердечника) и осевое смещение на 1% (для ОВ с апертурой 0,2) вызывает затухание 0,25 дБ (кривые 1 и 2 рис. 10.22). Продольное смещение сказывается меньше — при смещении на величину радиуса сердечника затухание равно 0,14 дБ (кривая 3 рис. 10.22).

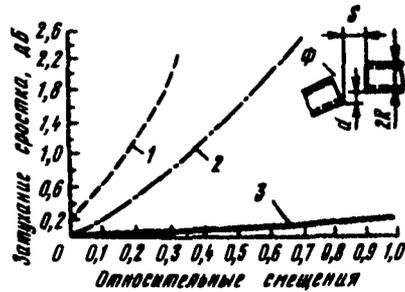


Рис. 10.22. Влияние на затухание сращиваемых многомодовых ОВ относительного углового $\Phi/\sin^{-1}NA$ (кривая 1), продольного d/R (кривая 2) и поперечного S/R (кривая 3) смещений

При сращивании одномодовых ОВ нежелательное влияние рассогласований различных параметров ОВ на затухание сростков проявляется еще резче чем в многомодовых волокнах.

На рис. 10.23, а показана зависимость затухания сростка от поперечного смещения осей. Установлено, что для одномодового ОВ с сердечником 8...10 мкм поперечное смещение осей волокон на 1,2 мкм приводит к затуханию сростка 2,5 дБ. На рис. 10.23, б показано, что при разнице в диаметрах области мод (размерах светового пятна) на 20% возникает затухание 2,2 дБ.

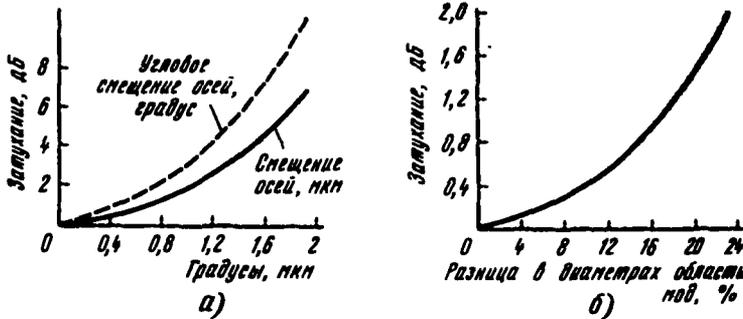


Рис. 10.23. Зависимость затухания сращиваемых одномодовых ОВ от поперечного и углового смещения осей (а) и разницы в диаметрах области мод (б)

10.6.3. Особенности аппаратуры для сращивания одномодовых и многомодовых ОВ

При строительстве ВОЛС на многомодовых ОК широкое применение получил комплект для сварки световодов КСС-111. Устройства и приспособления комплекта позволяют производить снятие оболочек с ОК, снятие защитных покровов с ОВ, скол ОВ и установку комплекта деталей для защиты места сростка.

После специальной обработки свариваемых концов ОК закрепляют в блоке юстировки в V-образных канавках с помощью магнитных прижимов. После юстировки концы ОВ помещают в поле вольфрамовых электродов в плоскости юстируемых ОВ. На электроды подают высокочастотное высоко-

вольное напряжение, и при возникновении дуги в его тепловом поле происходит сплавление сращиваемых ОВ. Схема электронного блока обеспечивает регулировку тока оплавления и сварки ОВ, времени горения дуги в этих режимах, скорости сближения ОВ и др. Наблюдение за процессами юстировки и сварки производится через микроскоп в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Комплект обеспечивает сращивание градиентных многомодовых ОВ со средней величиной потерь 0,2 дБ.

Для сварки одномодовых ОВ требуется применение прецизионной аппаратуры с автоматическим управлением процессами сварки. На рис. 10.24, а приведена схема для автоматической сварки одномодовых волокон тремя способами.

При первом способе (рис. 10.24, б) излучатель и приемник устанавливаются на противоположных концах соединяемых ОВ, а данные измерений передаются к месту сращивания для управления процессом сварки ОВ. При втором способе (рис. 10.24, в) излучатель устанавливают на входе ли-

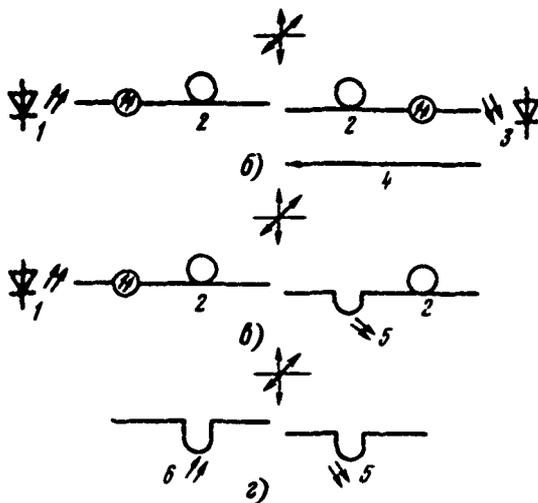
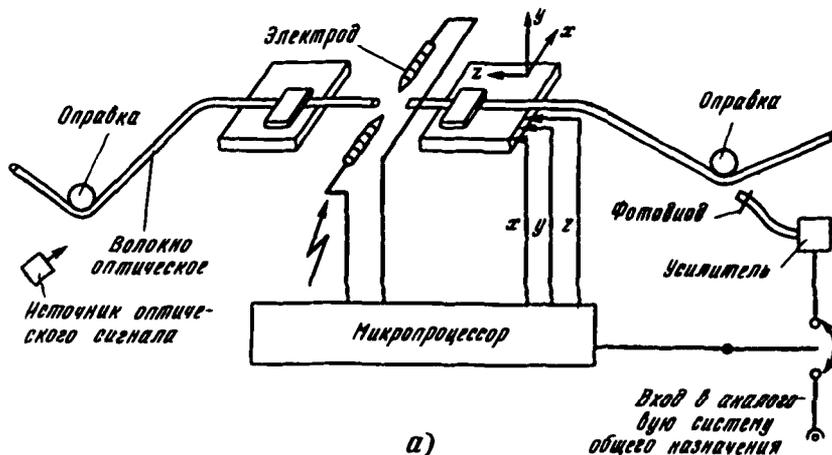


Рис. 10.24. Схема (а) автоматического устройства с процессорным управлением для сварки одномодовых ОВ тремя способами (б—г):

1 — источник света; 2 — проложенная длина кабеля; 3 — приемник; 4 — обратная связь; 5 — вывод светового потока; 6 — ввод светового потока

нии, а приемник — в точке соединения сращиваемых ОВ; по показаниям приемника управляется процесс юстировки, сближения ОВ и их сварки. При третьем способе (рис. 10.24,з) операции ввода и вывода испытательного сигнала производятся в месте сращивания в точках изгиба ОВ.

По схеме, приведенной на рис. 10.24,а, работает устройство фирмы ВСС (см. табл. 10.6).

Правильное использование устройств, приведенных в табл. 10.6, дает возможность получить сростки со средней величиной затухания меньше 0,1 дБ (на одинаковых ОВ). На практике для сращивания различных строительных длин, когда ОВ имеют разные параметры, средняя величина затухания находится в пределах 0,11 ... 0,15 дБ.

10.6.4. Контроль качества сростков ОВ

Как указывалось выше, сварка ОВ производится с помощью встроенных в сварочный аппарат контролирующих средств, которые сразу после сварки дают цифровую оценку величины потерь, вносимых сростком в линию, например комплект фирмы ВСС (Великобритания) и др. (см. табл. 10.6). При использовании сварочных аппаратов без контрольной аппаратуры такую оценку можно производить несколькими методами.

Рефлектометрический метод. Этот метод осуществляется с помощью рефлектометров обратного рассеяния, работа которых основана на наблюдении на экране характеристик обратного излучения в ОВ, возникающих вследствие отражения зондирующих сигналов от рассеянных и локальных неоднородностей. На рис. 10.25 дан пример записи сигнала обратного рассеяния. На рефлектограмме видны резкие изменения мощности обратного рассеяния, соответствующие разным неоднородностям.

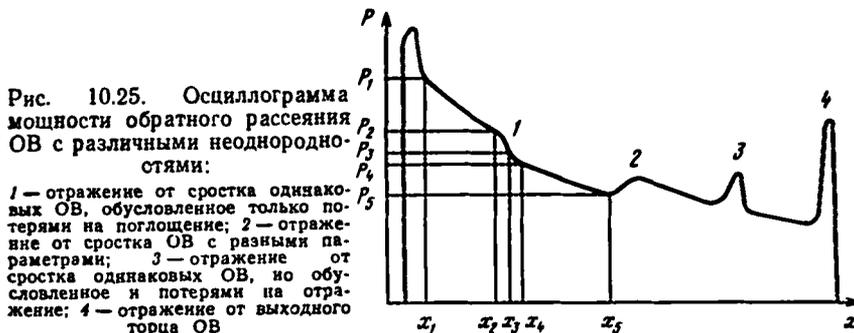
По оси ординат оценивают величину дополнительных потерь, внесенных выполненным сростком. Этот метод особенно удобен тем, что, во-первых, это неразрушающий метод и, во-вторых, для оценочных измерений иногда бывает достаточно проведения измерений с одного конца ОК. Однако рефлектометрический метод обладает следующими недостатками:

при оценке затухания стыка, состоящего, как правило, из разнородных ОВ, для получения верного результата измерения потерь необходимо выполнять в двух направлениях с последующим усреднением результата;

современные рефлектометры позволяют производить такие измерения на ограниченных расстояниях;

дефицитность в настоящее время рефлектометров обратного рассеяния.

Метод прямого измерения затухания. Затухание от потерь в сростке $a_{\text{пот}}$ определяют путем измерения затухания волокон до их соединения a_1 и a_2 , а затем после их соединения — суммарного затухания a линии по формуле $a_{\text{пот}} = a - (a_1 + a_2)$. Для этого метода требуется применение средств измерений с погрешностью менее 0,1 дБ.



Марка устройства для сварки ОВ (фирма, страна)	Средние потери на сросток, дБ	Тип сращиваемо- го волокна	Время сра- щивания, мин	Способ юсти- ровки
AFS-3100 (BICC, Велико- британия)	0,06	Одномодовое	5	Автомати- ческий
MK4/MK4SM (NKF, Ни- дерланды)	0,10	Градиентное	3...5	То же
OFSK-15 (STC comp. США)	0,26	То же	10	Механи- ческий
S-46999 (Siemens, ФРГ)	0,06	»	3...5	То же
NTGF-22AA (NT, Канада)	0,05; 0,03	Одномодовое	10	»
SMFASM (NTT, Япония)	0,06	То же	2...3	Автомати- ческий
Fiber Pack 1000 (Reichem, США)	0,07	»	10	Автомати- ческий
PXS (RXS, ФРГ)	0,1	Одномодовое и многомодовое	0,5	То же
KCC-111 (СССР)	0,1	Многомодовое	3...5	Механи- ческий

Метод трех измерений. Сущность метода поясняется рис. 10.26. Источник излучения подключают к началу линии в точке А со стороны начала первой монтируемой длины l_1 кабеля и выполняют временное соединение. Затем последовательно измеряют значения оптической мощности P_1 на конце присоединяемой оптической длины, P_2 в месте проведения монтажа за сростком и P_3 перед сростком. Затем выполняют постоянное соединение и измеряют оптическую мощность P_1' . Искомую величину затухания, дБ, в сростке определяют по формуле $a_{\text{пот}} = 10 \log \frac{P_1 P_1'}{P_2 P_3}$. Погрешность измерения зависит в основном от временных нестабильностей (на интервале около 10 мин) измерителя мощности, источника излучения и изменения модового состава излучения за местом сростка.

Метод косвенных измерений. При идеальных юстировке и подготовке торцов свариваемых ОВ дополнительное затухание в стыке до сварки составляет около 0,35 дБ и обусловлено двойными потерями на френелевское отражение. Затухание, дБ, в стыке до сварки $a_{\text{до св}} = a_{\text{вст}} + 0,35$, где

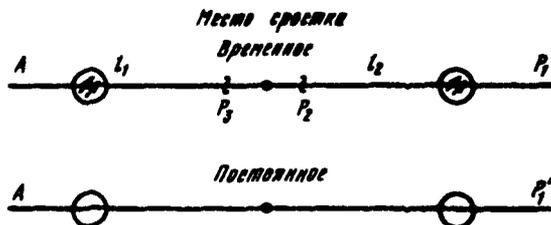


Рис. 10.26. Контроль качества сростка ОВ методом трех измерений

Таблица 10.6

Устройство наблюдения	Напряжение питания, В		Масса, кг	Габаритные размеры, мм
	Сеть	Батарея		
Микроскоп	220/110, 50...60 Гц	24	20	411×297×297
То же	220/110, 50...60 Гц	24	12 (блок срачивания) 13,6 (блок питания)	360×210×240 360×210×240
»	220/110, 50...60 Гц	12	10,5	300×412×230
»	220/110, 50...60 Гц	12	15,0	420×320×180
»	220/110, 50...60 Гц	12	11,3	350×275×275
Дисплей	110, 50...60 Гц; 5 (блок контроля)	12	14 (блок срачивания) 4	250×220×265 390×330×240
Микроскоп	110/220, 50 Гц	—	20,0	480×405×265
То же	110/220, 50...60 Гц	12	16,0	420×320×180
»	—	12	16,0	450×250×200

$a_{\text{звук}}$ — потери, обусловленные внутренними факторами из-за разности диаметра ОБ, а также их сердцевины и оболочки, эллиптичности и неконцентричности сердцевины ОБ и т. д.

Сказанное справедливо в случае строгого визуального контроля качества скола. Визуальный контроль с помощью устройства КСО-111 на отсутствие видимых неровностей и неперпендикулярности торца ОБ позволяет добиться величины потерь до сварки, не превышающей 0,55 дБ.

При идеально выполненной сварке величина потерь в сростке $a_{\text{пот}}$ равна $a_{\text{звук}}$. Таким образом, после идеально выполненной сварки должно произойти уменьшение затухания на 0,35 дБ. Если затухание будет меньше чем на 0,35 дБ, то это означает, что при сварке внесены дополнительные потери, величина которых может быть определена из соотношения $a_{\text{доп}} = 0,35 - \Delta a$, где Δa — уменьшение потерь в сростке после сварки ОБ.

Полученные экспериментально критерии оценки качества сростков ОБ, сваренных с помощью устройства КСС-111, приведены в табл. 10.7. При

Таблица 10.7

Режим сварки ОБ с помощью устройства КСС-111	Уменьшение потерь в сростке ОБ после его сварки Δa , дБ, на	Ожидаемые дополнительные потери $a_{\text{доп}}$, дБ, внесенные при сварке ОБ
Автоматический	0,3...0,4 <0,3	$\leq 0,15$ >0,16
Ручной	0,3...0,5 <0,3	0,15 с вероятностью 85% $\leq 0,2$ с вероятностью 99% >0,2 с вероятностью 99%

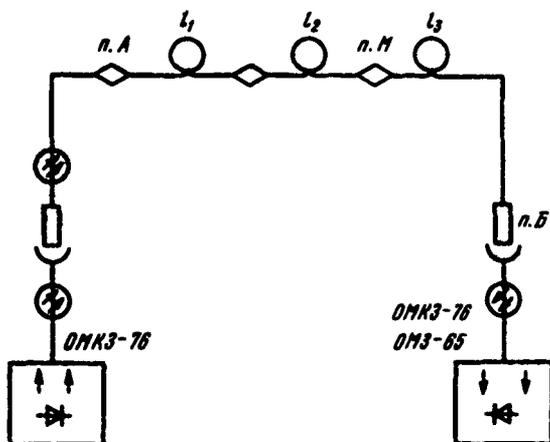


Рис. 10.27 Схема для контроля затухания сростков ОВ методом косвенных измерений

использовании этих критериев качества сращивания ОВ до 20% сростков при автоматическом и до 25% при ручном режиме сварки может быть забраковано ошибочно, что приведет к повторным сварке, измерению затухания и соответственно увеличению объема работ.

На рис. 10.27 приведена схема для контроля затухания сростков ОВ методом косвенных измерений при монтаже муфты между второй и третьей строительной длиной. В пункте монтажа (п. М) оператор осуществляет все необходимые подготовительные операции (скол ОВ, юстировку, предварительное оплавление), затем в п. Б измеряют оптическую мощность P_1 , сваривает стыкуемые ОВ, защищает место сростка и измеряет оптическую мощность P_2 . Далее по формуле $\Delta\alpha = 10 \lg(P_2/P_1)$ вычисляют величину уменьшения потерь в сростке ОВ после его сварки и по описанным критериям производят оценку качества сростка. Временная нестабильность применяемых средств измерения не более 0,05 дБ в течение 1 мин.

10.6.5. Конструкции соединительных муфт

Муфты СМОК и ММОК. Смежные строительные длины кабелей ГТС, прокладываемых в канализации, соединяют с помощью соединительной муфты (СМОК), а кабелей внутризоновой и междугородной сети, прокладываемых непосредственно в грунт, с помощью муфты ММОК.

Обе муфты представляют комплект деталей и полуфабрикатов, изготовленных по соответствующим ТУ. Пример записи муфт при заказе: «Муфта соединительная оптического кабеля связи СМОК ТУ45—86 АХП4. 468.049 ТУ»; «Муфта соединительная для междугородного оптического кабеля ММОК ТУ45—87—АХПО 446.001 ТУ».

На рис. 10.28 приведены эскизы конструкций соединительных муфт. Муфта типа СМОК имеет металлический каркас, состоящий из двух желобов из листовой стали толщиной 1 мм, длиной по 900 мм, двух полиэтиленовых фляцев с конусообразными патрубками для ввода ОК и полиэтиленового корпуса. При монтаже нижний желоб устанавливается на двух смежных консолях и является основной деталью собираемой муфты. В нем размещаются сростки оптических волокон, защищенные специальным комплектом, и запас ОВ. Масса муфты 3 кг, температурный диапазон эксплуатации —50...60°С.

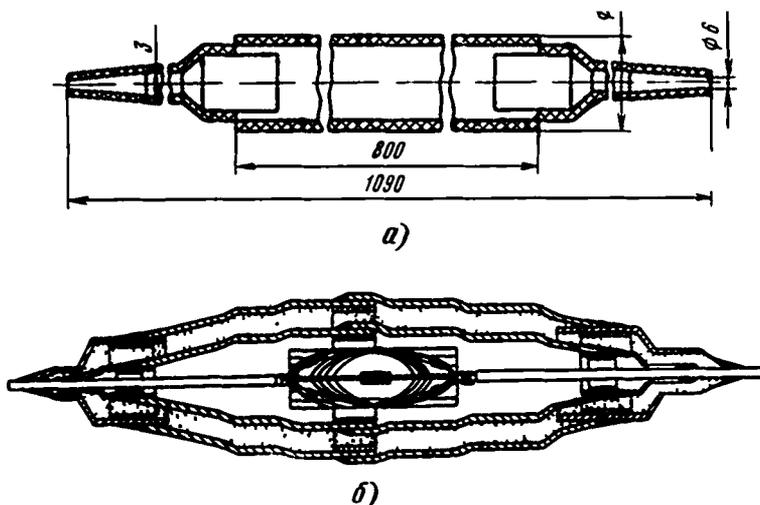


Рис 10 28 Муфта соединительная для городского (а) и междугородного (б) кабелей

Муфта ММОК выполняется в пластмассовом корпусе. Основой ее является кассета, на которой размещаются сростки соединенных ОВ, помещенные в защитные гильзы, и запас ОВ по 1,5 м с каждой стороны сростка. Кассета размещается в полиэтиленовом корпусе внутренней муфты, образуемой соединением полумуфт. В свою очередь, внутренняя муфта помещается в полиэтиленовый корпус внешней муфты, состоящей из полумуфт. Внутренняя и внешняя муфты заканчиваются полиэтиленовыми конусами. Пространство между внутренней и внешней муфтами заполняется гидрофобной массой. Масса муфты 3 кг, температурный диапазон эксплуатации —60... 50° С.

Путем подбора полиэтиленовых конусов можно получить два типоразмера муфт ММОК12/20 — для ОК с наружным диаметром 12 . 20 мм и ММОК17/27 — для оптических кабелей с наружным диаметром 17 . 27 мм.

Герметизация стыков отдельных деталей муфт и ОК производится при помощи термоусаживаемых трубок соответствующих диаметров или путем наплавления полиэтиленовой ленты под стеклоленту.

Комплект защиты сростка ОВ. После сращивания ОВ место сплавления и прилегающие участки ОВ, с которых было удалено защитное покрытие, необходимо защитить от воздействия внешней среды. Для этого в комплект поставки муфт входит специальная гильза для защиты сростка ОВ (ГЗС). Она состоит из термоусаживаемой трубки диаметром 35 мм, внутри которой находится трубка меньшего диаметра из сэвилена (ацетат-этиленвинил-клей-расплав). Между этими трубками имеется армирующий стальной стержень диаметром 1 мм. Гильзу перед сплавлением концов сращиваемых ОВ надевают на один из концов ОВ, а после их сварки нажимают на место сростка и нагревают. При повышении температуры нагрева сэвилен расплавляется и приклеивается к краям защитного покрытия ОВ. При этом наружная термофитная трубка, нагреваясь и уменьшаясь в диаметре, плотно обжимает весь защищаемый сросток, предохраняя его от внешних влияний. На рис 10 29 приведен эскиз конструкции защитной гильзы.

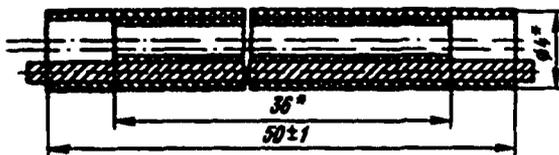


Рис 10 29 Гильза для защиты места сростка ОВ

Муфта типа LM производства ФРГ (фирма KWO). В зависимости от числа оптических волокон в кабеле в муфте типа LM устанавливается 4, 8 или 16 кассет с закрепленным в ней сростком ОВ и его запасом длиной по 1,5 м с каждой стороны. Каждый сросток закрывается специальным защитным комплектом LMS1. В зависимости от числа кассет в муфте (т е от емкости ОК) муфта имеет обозначение LM4, LM8 или LM16.

Корпус муфты разборный и состоит из двух частей, соединяемых расположенными по периметру корпуса болтовыми соединениями. Вдоль соприкасающихся частей корпуса в специальный паз укладывается силиконовая прокладка, обеспечивающая в собранном виде герметизацию корпуса (рис 10 30)

К головной и хвостовой частям корпуса муфты крепятся кабельные вводы с уплотнительными элементами, обеспечивающие соединение сращиваемых концов ОК и герметизацию корпуса муфты. Каждая муфта имеет четыре кабельных ввода с уплотняющими элементами. Для соединительной муфты используют только два кабельных ввода, а остальные вводы используют в распределительной муфте (например, ОК с восемью ОВ развести на два четырехволоконных ОК и т д)

Корпус муфты изготовлен из негорючего стеклопластика. Температурный диапазон эксплуатации муфты $-25 \dots 55^{\circ}\text{C}$, а хранения $-40 \dots 55^{\circ}\text{C}$, допустимая величина натяжения ОК, выходящих из кабельных вводов, 5...10% допустимой величины натяжения ОК, диаметр вводимых ОК 5...12 мм, размер муфты LM8 $630 \times 164 \times 125$ мм; масса 5,5 кг. При монтаже в телефонных колодцах муфта и запас ОК размещаются на специальном поддоне, закрепляемом на двух смежных консолях.

Муфта типа FOSC 100 фирмы Raychem (США). Конструкция муфты FOSC 100 (Fiber Optic Splice Closure) является разновидностью так называемых «стаканчиковых» или «тупиковых» муфт (рис. 10 31). Основание муфты содержит четыре патрубка для ввода кабелей диаметром 9,25...25 мм. К основанию муфты крепится специальный держатель для шести кассет, на каждой из которых может располагаться до 24 защищенных сростков ОВ с запасом волокна. Кассеты закрываются «стаканом», выполненным из полимера высокой прочности. Герметизация на стыках «кабель—патрубок

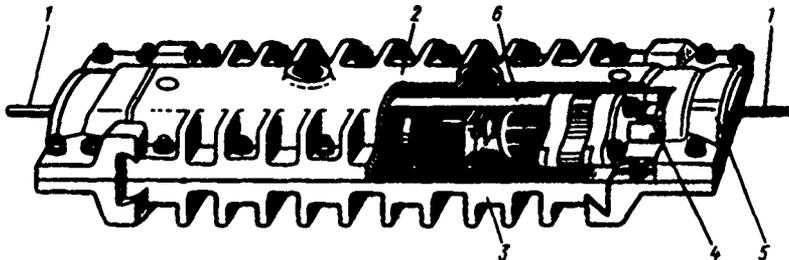


Рис 10 30 Муфта типа LM.

1 — ОК, 2 — верхняя полуоболочка, 3 — нижняя полуоболочка; 4 — кабельный ввод; 5 — уплотняющий элемент, 6 — монтажная рама для кассет с запасом и сростками ОВ

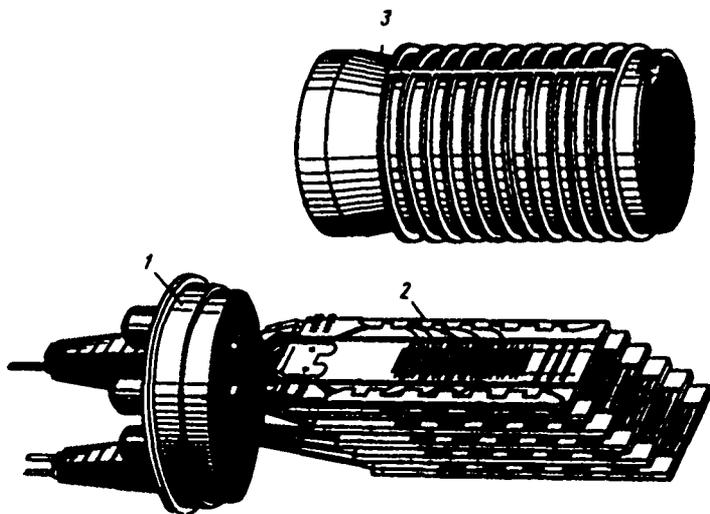


Рис. 10.31. Муфта FOSC 100:

1 — основание муфты с четырьмя патрубками для ввода ОК; 2 — кассеты с запасом и сростками ОБ; 3 — корпус муфты

основания» и «основание—стакан» осуществляется с помощью манжетов из термоусаживаемых полиэтиленовых трубок с подклеивающим слоем. Муфта допускает неоднократный перемонтаж при проведении профилактических и аварийно-восстановительных работ.

10.6.6. Оборудование вводов и монтаж оконечных устройств

На ГТС оптический кабель через стационарный колодец заводится в шахте здания с АТС, где линейный ОК с полиэтиленовой оболочкой с помощью обычной соединительной муфты стыкуется с таким же кабелем с полихлорвиниловой оболочкой. По помещениям станции в целях пожарной безопасности допускается прокладка кабелей только с оболочками из негорючих материалов. Такие ОК выпускаются по тем же техническим условиям, что и кабели с полиэтиленовыми оболочками.

Далее этот кабель по межэтажным кабельростам поступает в оптический ЛАЦ к вводной стойке оптического кабеля (ВСОК), где его ОБ соединяются со световодными соединительными шнурами (ШСС), которые подводят оптический сигнал к аппаратуре — кассетам оборудования линейного световодного тракта (КОЛСТ).

Оптический сигнал с излучателя квантово-электронного модуля (КЭМ), расположенного на передней панели блока линейного регенератора (РЛ), поступает в оптическое волокно через вводные втулки. К этим втулкам с помощью резьбового соединения подключается разъем ШСС, второй конец которого присоединяется к соответствующему ОБ линейного ОК. Шнур ШСС представляет собой ОБ ступенчатого типа с полиамидным защитным покрытием. Волокно совместно с армирующими синтетическими нитями типа СВМ (синтетическое с высоким модулем прочности на растяжение) защищается внешней оболочкой из поливинилхлорида внешним диаметром 1... 3 мм. Шнуры поставляются в составе аппаратуры длинами по 60 м, с оконцованными разъемами на обеих сторонах, в которых закреплены концы оптических волокон. Разъемы изготавливаются в заводских условиях; ОБ в них отцентрированы и зафиксированы эпоксидной смолой, а торцы волокон отполированы.

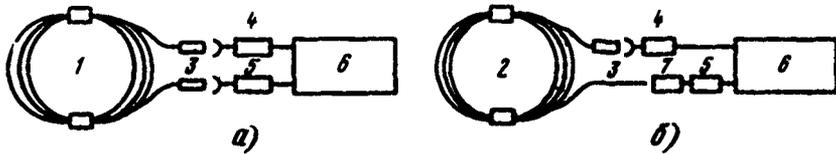


Рис. 10.32. Схема проверки целостности ШСС с двумя (а) и одним (б) разъемами:

1 — ШСС длиной 60 м; 2 — ШСС длиной 30 м; 3 — разъем ШСС; 4 — излучатель тестера, 5 — фотопреобразователь, 6 — тестер оптический ОМКЗ-76; 7 — адаптер

Перед прокладкой шнуры разрезают и этими концами приваривают к ОВ линейного кабеля. Сварка ШСС с ОВ производится обычным способом, место сварки защищается комплектом ГЭС. Перед сваркой ОВ, после их прокладки между аппаратурой (разъемом регенератора) и устройством стыка стационарного и линейного кабелей (УССЛК) разъемы шнуров промывают спиртом и с помощью лупы или микроскопа проверяют качество полировки торца ОВ. Затем оптическим тестером проверяют весь отрезок ШСС.

Измерения затухания ШСС, оборудованного с обеих сторон разъемами «Лист—Булава», производятся в обоих направлениях по схеме рис. 10.32, а. Величина затухания ШСС длиной 60 м не должна превышать 3 дБ; в противном случае шнур считают поврежденным и заменяют. Шнур с одним разъемом проверяют по схеме рис. 10.32, б. В случае положительных результатов проверки ШСС прокладывают по кабельростам между стойками СОЛСТ, где установлены кассеты с регенераторами, и стойкой ВСОК, на которой устанавливают УССЛК.

Устройство УССЛК конструктивно выполнено в виде металлической коробки габаритными размерами 280×220×120 мм, состоящей из кожуха и съемной крышки с замками. В кожухе установлены платы для намотки излишков ОВ после сварки. Линейный ОК и шнуры ШСС входят в кожух через специальные патрубки. В патрубках УССЛК имеются резиновые втулки, которые при закручивании гаек сжимаются и фиксируют ОК или ШСС. Устройство УССЛК содержит один патрубок для ввода линейного кабеля и восемь для ввода ШСС.

Контроль качества монтажа УССЛК осуществляют по схеме рис. 10.33, а с помощью двух тестеров ОМКЗ-76, расположенных на конечных станциях. Затухание измеряют трижды: после юстировки ОВ кабе-

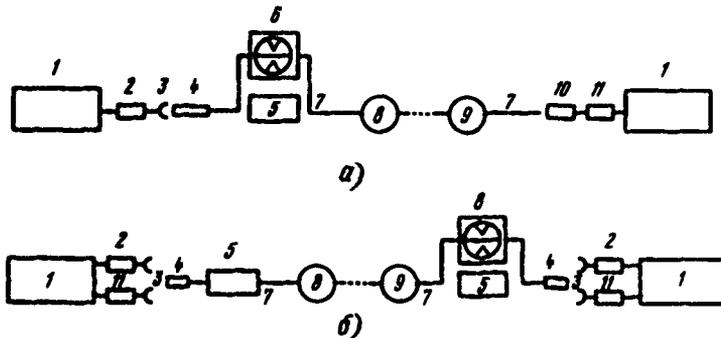


Рис. 10.33. Схема проверки качества монтажа ШСС на станции А (а) и станции Б (б):

1 — тестер ОМКЗ 76; 2 — излучатель тестера, 3 — оптический разъемный соединитель; 4 — ШСС; 5 — УССЛК; 6 — свариваемое ОВ в КСС-111; 7 — ОВ линейного ОК; 8—9 — соединительные муфты ОК на РУ, 10 — адаптер тестера, 11 — фотопреобразователь тестера

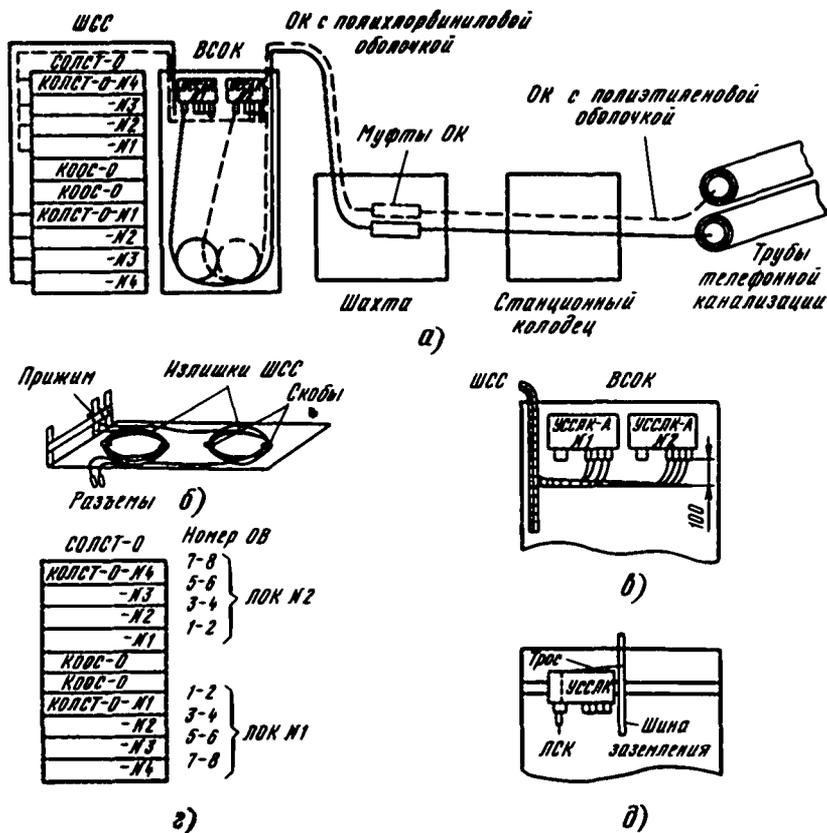


Рис. 10.34. Подключение линейных ОК к СОЛСТ-О:

а — схема соединения двух линейных кабелей с кассетами КОЛСТ-О, б — размещение ШСС; в — расположение жгутов ШСС в стойке ВОСК; г — распределение волокон линейного кабеля по кассетам стойки СОЛСТ-О, д — заземление армирующего троса линейного ОК

ля с ОВ ШСС, сразу после сварки и после установки кассет с запасом ОВ в УССЛК. После окончания монтажа на станции А монтируют УССЛК на станции Б. Контроль монтажа при этом проводят по схеме рис. 10.33, б.

На рис. 10.34 приведена схема включения двух восьмиволоконных ОК с кассетами КОЛСТ-О на оконечной станции системы «Соната-2». В них установлены блоки регенераторов линейных (РЛ) с квантово-электронными модулями, к которым подключают ШСС.

Оконечным станциям ВОЛС в проекте присваивают индексы А или Б. Передача в направлении А—Б производится по нечетным волокнам линейного ОК, а в направлении Б—А — по четным волокнам. Индекс станции отражается в маркировке соответствующего УССЛК.

На рис. 10.43 приведены эскизы, поясняющие выполнение отдельных операций по монтажу оконечных устройств ВОЛС ГТС.

Монтаж НРП на междугородных ВОЛС сводится к подключению концов линейного ОК к двум стабикабелям длиной по 10 м, выходящим из контейнера НРПГ (рис. 10.35). При вводе ОК с жилами для передачи дистанционного питания в здание обслуживаемого пункта необходимо производить

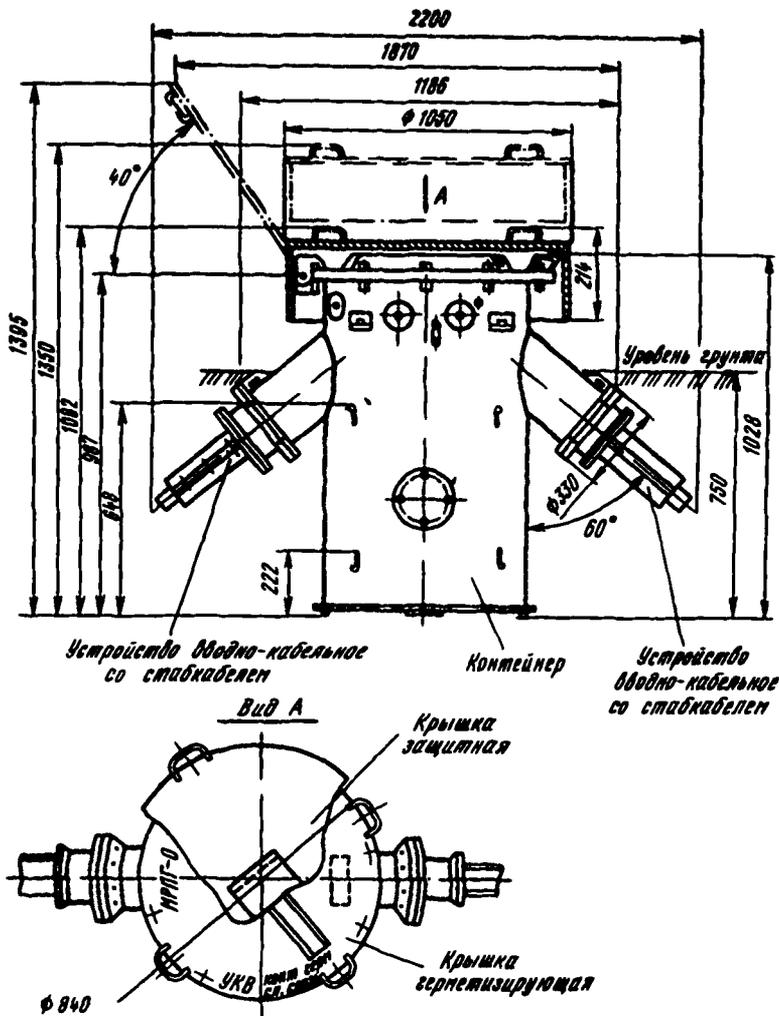


Рис. 10 35 Контейнер необслуживаемого регенерационного пункта

подводку этих цепей к блокам ДП и подключение к металлическим элементам ОК заземления. Для выделения цепей ДП используют одноцветный кабель в полихлорвиниловой оболочке типа ЗКВ-1×4×1,2. Подключение заземления производится любым медным проводом сечением не менее 4 мм². Разветвительную муфту устанавливают в помещении вводной шахты станционного здания обслуживаемого пункта.

На рис. 10 36 показана последовательность указанных работ на ОК типа ОЗКГ-1. На месте установки корпуса разветвительной муфты снимают полиэтиленовую оболочку линейного ОК. Стальные проволоки брони и медные жилы ДП сращивают соответственно с проводом заземления и жилами кабеля ЗКВ. На место сращения надевают разрезанную вдоль полумуфту (свинцовую или полиэтиленовую внутреннюю с конусом от муфты ММОК).

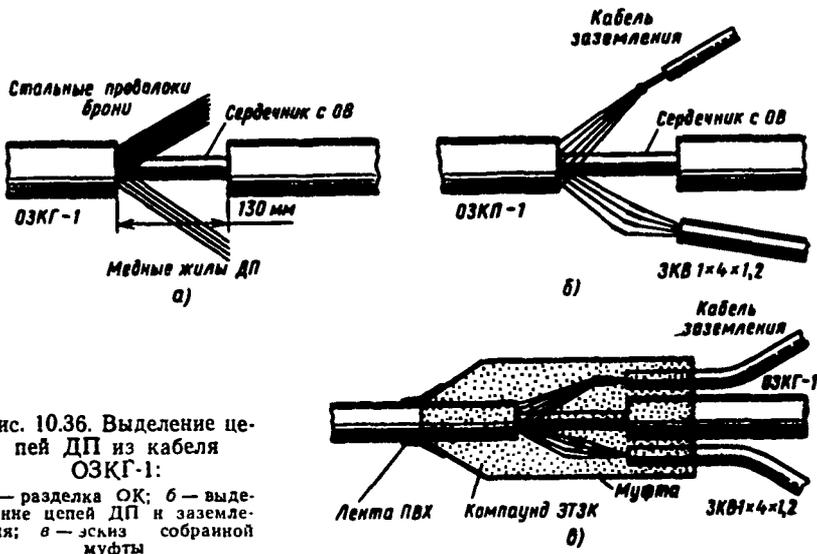


Рис. 10.36. Выделение цепей ДП из кабеля ОЗКГ-1:

а — разделка ОК; б — выделение цепей ДП и заземления; в — эскиз собранной муфты

На конус муфты и оболочку ОК наматывают пять—шесть слоев полихлорвиниловой клейкой ленты. Затем, закрепив муфту с ответвлениями в вертикальном положении, заливают в нее эпоксидно-тиоколовый компаунд. После отверждения компаунда муфту и ответвленные кабели укладывают в горизонтальное положение на кабельрост.

10.6.7. Основные материалы для монтажа ОК и условия их применения

Полиэтилен. Основной материал, применяемый для изготовления шланговых покрытий ОК и деталей корпусов соединительных муфт, — это полиэтилен (точнее — кабельные композиции полиэтилена высокого давления и низкой плотности, выпускаемые по ГОСТ 16336—77). Основное распространение получили четыре базовые марки полиэтилена: 102, 107, 153 и 178, каждая из которых, в свою очередь, также выпускается в четырех композициях: 01К, 02К, 04К и 10К. Рабочий диапазон температур полиэтилена: $-60 \dots 80^\circ \text{C}$, плотность 920 кг/м^3 ($0,92 \text{ г/см}^3$), выпускается в виде гранул.

В табл. 10.8 приведены некоторые физико-химические показатели наиболее распространенных кабельных композиций полиэтилена.

Таблица 10.8

Показатель	Композиция полиэтилена	
	178-10К	153-10К
Текучесть расплава, г/10 мин	1,5	0,32
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	11,7	12
Предел текучести при растяжении, МПа	8,2	8,3
Относительное удлинение при разрыве, %	480... 560	580... 620
Твердость, МПа	60,0	63,7
Температура хрупкости, $^\circ \text{C}$	Ниже 60°	Ниже 60°

При монтаже соединительных муфт ОК полиэтилен применяется в виде ленты толщиной 0,1 и 0,2 мм и используется для сварки отдельных деталей полиэтиленовых соединительных муфт, а также сварки оболочки ОК с концами соединительных муфт. Стыкуемые детали муфт и оболочки кабелей в области стыка зачищают ножом или металлической щеткой. На стык плотно наматывают несколько слоев полиэтиленовой ленты, а поверх нее с небольшим перекрытием — несколько слоев стеклотенты. Затем открытым пламенем газовой горелки или паяльной лампы прогревают область стыка, обмотанную стеклотентой. В результате при соблюдении определенного временного и температурного режима происходит сплавление полиэтиленовой ленты с обеими частями стыкуемых деталей. В табл. 10.9 приведены реко-

Таблица 10.9

Свариваемые детали	Количество слоев лент		Количество циклов пауза—нагрев	Время, мин			
	полиэтиленовой	стеклоленты		предварительного нагрева	паузы	нагрева	процесса сварки
Внутренней муфты	3...4	2...3	6	2	0,5	0,5	8
Внешней муфты	10	4	6	5	1	1	17

мендуемые режимы сварки методом наплавления полиэтиленовой ленты для междугородной муфты ММОК.

Режим сварки крайних стыков внешней муфты с оболочкой ОК такой же, как для деталей внутренней муфты.

После остывания места сварки (примерно до 50...60° С) стеклотенту удаляют и осматривают шов. Поверхность наплавленного слоя должна быть однородной, без видимых трещин, раковин и расслоений. Полиэтиленовая лента выпускается по ГОСТ 10354—81, а стеклотента шириной 30 мм — по ГОСТ 5937—81.

Термоусаживаемые трубки. Термоусаживаемые трубки представляют собой полимерные трубки (из полиэтилена, полипропилена, полихлорвинила), обработанные специальным образом и обладающие способностью при нагревании уменьшить свой диаметр — «усаживаться». Наиболее широкое распространение в настоящее время получили радиационно-модифицированные трубки из полиэтилена. Это трубки, которые в нагретом и раздутном состоянии подвергались радиационному облучению определенной энергией и последующему охлаждению. Себестоимость операции радиационного модифицирования примерно равна стоимости исходного сырья.

Такие трубки с подклеивающим слоем для монтажа ОК применяют при защите мест сварки оптических волокон, термозащитных стыков, полиэтиленовых деталей муфт, а также в местах соединения оболочки ОК с элементами муфт. Для этого применяют трубки ТТЭ-С, ТТШ и ТТЭ-Т, изготовленные соответственно из полиэтилена высокого давления низкой плотности 153-01К, 153-10К и 102-57 по техническим условиям ТУМИ 703-83, ТУ 16-503.229—82 и ТУ 16-503.250-84. Кроме того, выпускаются трубки «Радпласт Т», изготовленные из полиэтилена 102-228 и 102-114 по ТУ 6-19.229—86. Эти трубки выпускаются в виде шланга с внутренним диаметром 1,4...120 мм. Их размеры приведены в табл. 10.10.

Перед соединением термоусаживаемые трубки надвигают на любой из срощиваемых концов ОК. Защищаемые поверхности деталей очищают и

Таблица 10.10

«Радпласт Т-1»			Радпласт Т-2			Масса 1 м трубки, г
Внутренний диаметр, мм		Толщина стен, мм	Внутренний диаметр, мм		Толщина стен, мм	
до усадки	после усадки		до усадки	после усадки		
12	6	0,6±0,1	12	6	0,6±0,1	12,4
20	10	1,0±0,1	20	10	1,0±0,1	33,3
30	15	1,0±0,2	30	15	1,0±0,2	61,6
40	20	1,0±0,2	40	20	1,0±0,2	81,3
60	25	1,5±0,2	—	—	—	105,4
60	30	1,5±0,3	60	30	1,5±0,3	147,8
80	40	1,5±0,3	80	40	1,5±0,3	186,6
100	50	1,5±0,3	100	50	1,5±0,3	225,0
120	60	2,5±0,3	—	—	—	480,0

обезжиривают. На обезжиренные поверхности наматывают подклеивающий элемент и надвигают термоусаживаемую трубку. Термоусадку трубки производят открытым пламенем паяльной лампы или газовой горелки от середины трубки к ее краям.

Термоусаживаемые трубки, применяемые для монтажа ОК, должны иметь ровную и гладкую поверхность без пор и трещин, ровно обрезанные торцы и осевую усадку, не превышающую 10% длины трубки. Для обеспечения достаточной плотности обжатия необходимо применять трубки с диаметром после усадки на 10...20% меньше диаметра соединяемых деталей. Если после усадки одной трубки необходимой толщины защитного слоя достичь не удастся, для увеличения механической прочности покрытия используют несколько трубок, последовательно усаживаемых на место соединения. Длина каждой последующей трубки должна превышать длину предыдущей.

Монтажные работы с применением термоусаживаемых трубок выполняют при температуре не ниже -15°C , минимально допустимая температура эксплуатации мест соединений, защищенных трубками, -60°C .

Наряду с описанными выше трубками в последнее время начал выпуск термоусаживаемых пленок, применение которых при проведении ремонтно-восстановительных работ более удобно. Наиболее перспективными материалами следует считать осваиваемые в настоящее время двухслойные термоусаживаемые пленки с подклеивающим слоем.

Материалы, используемые в качестве подклеивающего слоя. В качестве подклеивающего элемента при монтаже ОК применяют клей-расплав, представляющий собой в исходном состоянии твердое вещество. При нагреве выше определенной температуры клей-расплав переходит в вязко-текучее состояние с хорошей адгезией к полимерным материалам: полиамиду, эпоксиакрилату, полиэтилену, термоусаживаемому полиэтилену и др. В качестве клея-расплава наиболее распространен сэвillen — сополимер этилена с винилацетатом; выпускается он в виде гранул по ТУ 6-05-1636—81, из которых выпрессовывают трубки, ленты и другие детали. При монтаже ОК применяются марки 115-01, 107-01, 118-01.

При использовании в качестве подклеивающего слоя для защиты сростков ОВ допускается замена на клей-расплав типа ГИПК-14-13, выпускаемый по ТУ 6-05-251—79 в виде прутков диаметром 25...30 мм. При нанесении ГИПК-14-13 на участок усадки термоусаживаемой трубки конец прутка оплавляют открытым пламенем газовой горелки или паяльной лампы, не до-

пуская его воспламенения. Затем расплав наносят сплошным ровным слоем толщиной 1,5—2 мм на всю поверхность участка герметизации.

При работе с клеями расплавами следует иметь в виду, что температура их прессования в зависимости от конкретной марки материала находится в пределах -80 — -140°C , а температура разложения порядка $+350^{\circ}\text{C}$.

10.6.8. Оценка трудоемкости монтажных работ на ВОЛС

Трудоемкость монтажных работ определяется в основном земляными работами при разработке и засыпке котлованов, измерительными работами по контролю за качеством срезков ОВ и непосредственно работами по монтажу соединительных муфт.

Определим трудоемкость основных монтажных работ для одного регенерационного участка. На вновь построенном регенерационном участке ВОЛС при числе строительных длин K число соединительных муфт определяют из соотношения $M=(K-1)+2$. Здесь учтены еще две муфты по концам регенерационного участка, соединяющие линейные кабели со стабикабелями, выходящими из унифицированного контейнера необслуживаемого регенерационного герметизированного пункта, в котором располагаются линейные регенераторы.

В процессе эксплуатации ВОЛС число муфт может увеличиться. Так, при устранении повреждений, например обрыве ОК или оптических волокон, в кабеле приходится делать кабельную вставку, соединяя ее с помощью двух соединительных муфт. В процессе эксплуатации общее затухание в линии может увеличиться больше чем на запас энергетического потенциала регенерационного участка (6 дБ). При достижении этого состояния необходимо или замесить участок линии с большим количеством муфт или установить на ней дополнительный регенератор.

На регенерационном участке длиной 25 км при строительной длине ОК, равной 2,2 км, число муфт определяют из соотношения $M=12-1+2=13$.

Трудоемкость работ по разработке и обратной засыпке котлованов, производимых двумя землекопами 1- и 2-го разрядов, определяют по формуле $T_{p3}=29 \cdot 13=377$ чел/дней.

Трудоемкость монтажных и измерительных работ определяют по данным ТК на монтаж соединительных муфт внутризоновых ОК. Для звена из двух человек (по одному спайщику 6- и 4-го разрядов) $T_m=31 \cdot 13=403$ чел/дней, трудоемкость измерительных работ $T_{изм}=31 \cdot 13=403$ чел/дней.

Далее определяют суммарную продолжительность основных работ по монтажу соединительных муфт ОК.

$$\text{Продолжительность работ} = \frac{\text{Трудоемкость} \times \text{Коэффициент, учитывающий непредвиденные и неучтенные работы}}{\text{Число работников} \times \text{Коэффициент, учитывающий рост производительности труда}}$$

При этом, из-за неосвоенности технологии монтажных работ на строительстве ВОЛС, коэффициент, учитывающий непредвиденные и неучтенные работы при измерительно-монтажных работах, следует брать в пределах 1,05—2,3. По этой же причине коэффициент роста производительности труда спайщиков и измерителей в первые строительные сезоны следует брать не более единицы. Для землекопов этот коэффициент за счет применения средств малой механизации может доходить до 1,2.

10.7. Техника безопасности

При выполнении работ следует руководствоваться «Правилами техники безопасности при работах на кабельных линиях связи и проводного вещания» (М., «Связь», 1979 г.) В дополнение к ним при работе с оптическим кабелем необходимо

применять на объектах строительства монтажно-измерительные автомашины, позволяющие монтажникам и измерителям выполнять сложные и утомительные работы (соответствующее освещение, вентиляция воздуха, соблюдение техники безопасности с высоким напряжением для сварки волокон и т. д.),

в монтажно-измерительной автомашине отходы оптического волокна при разделке (сколе) собирать в отдельный ящик, а после окончания монтажа закапывать в грунт,

избегать попадания остатков оптического волокна на одежду, работ с оптическим волокном производить в клеенчатом фартуке, монтажный стол и пол в монтажно-измерительной автомашине после каждой смены обрабатывать пылесосом и затем протирать мокрой тряпкой, тряпку отжимать в плотных резиновых перчатках;

при механизированной прокладке ОК в кабельной канализации обеспечивать надежную служебную связь каждого колодца, в котором находится вспомогательный персонал,

при монтаже оптических волокон помнить, что дуговой разряд, возникающий между электродами сварочного устройства, может быть причиной возгорания горючих газов в смотровых устройствах телефонной канализации.

при работе с преобразователями (например, с ЛД-0,85 и ЛД-1,3 оптического тестера ОМКЗ-76) не допускать прямого попадания в глаза излучения преобразователя или оптического волокна, подключенного к преобразователю;

чтобы растворители, применяемые при снятии защитного покрытия оптических волокон, имели класс опасности не ниже четвертого,

чтобы рабочая температура растворителя была ниже температуры их кипения,

иметь в виду, что растворители могут быть токсичными, огнеопасными и вызывать аллергию,

работу по разогреву и заливке гидрофобным наполнителем муфт ММОК производить в спецодежде, брезентовых рукавицах и защитных очках,

разогрев и заливку наполнителя производить в металлической посуде с крышкой, носиком для слива и ручками для переноски

Глава 11

Надежность волоконно-оптических линий связи

11.1. Основные понятия, параметры надежности

Надежность работы ВОЛС — это свойство волоконно-оптической линии обеспечивать возможность передачи требуемой информации с заданным качеством в течение определенного промежутка времени

Волоконно-оптическая линия связи в общем случае может рассматриваться как система, состоящая из двух совместно действующих сооружений — линейного и станционного. Каждое из этих сооружений при определении надежности может рассматриваться как самостоятельная система

В теории надежности используются следующие понятия

отказ — повреждение на ВОЛС с перерывом связи по одному, множеству или всем каналам связи,

неисправность — повреждение, не вызывающее закрытия связи, характеризуемое состоянием линии, при котором значения одного или нескольких параметров не удовлетворяют заданным нормам;

среднее время между отказами (наработка на отказ) — среднее время между отказами, выраженное в часах;

среднее время восстановления связи — среднее время перерыва связи, выраженное в часах;

интенсивность отказов — среднее число отказов в единицу времени (час) на 1 км трассы линии;

вероятность безотказной работы — вероятность того, что в заданный интервал времени на линии не возникает отказа;

коэффициент готовности — вероятность нахождения линии в исправном состоянии в произвольно выбранный момент времени;

коэффициент простоя — вероятность нахождения линии в произвольно выбранный момент времени в состоянии отказа

Количественно эти параметры оцениваются следующими выражениями.

Отказы характеризуются плотностью повреждений (плотностью отказов), проходящихся на 100 км трассы в год: $m = 100N/KL$, где N — число отказов на магистрали связи длиной L за K лет.

Среднее время между отказами (наработка на отказ) есть среднее число часов исправной работы линии между двумя соседними отказами

взятыми за определенный календарный срок эксплуатации: $T_0 = \sum_{i=1}^n \tau_i/n$.

где n — число отказов за принятый календарный срок; τ_i — время исправной работы между $i=1$ и $i=n$ отказами. ч.

Среднее время восстановления связи определяется для всей трассы:

$t_{\text{в}} = \sum_{i=1}^N t_{\text{в}i}/N$, где $t_{\text{в}i}$ — время восстановления связи при i -м отказе, ч.

Интенсивность отказов на 1 км трассы ВОЛС в час связана с плотностью повреждений зависимостью $\bar{\Lambda} = m/(8760 \cdot 100)$, где 8760 — число часов в году; 100 — длина трассы, км, при которой определяется значение m .

Параметр потока отказов Λ , 1/ч определяется на всю длину: $\Lambda = \Lambda \bar{L} = mL/(8760 \cdot 100)$.

Вероятность безотказной работы за принятый промежуток времени определяется показательной функцией $P(t) = e^{-\Lambda t}$, где t — промежуток времени, для которого определяется вероятность безотказной работы.

Коэффициент готовности определяется как отношение суммарного времени исправной (безотказной) работы к общему суммарному времени исправной работы и времени восстановления за один и тот же период эксплуатации: $K_r = T_0/(T_0 + t_{\text{в}}) = (T - t_{\text{в}})/T$, где T — время наблюдения; $t_{\text{в}}$ — время повреждения

11.2. Основные факторы, влияющие на надежность

Надежность ВОЛС зависит от конструктивно-производственных и эксплуатационных факторов. К конструктивно-производственным относятся факторы, связанные с разработкой, проектированием и изготовлением отдельных изделий и устройств, составляющих ВОЛС (оптического волокна, кабеля, соединительных муфт и т. д.). К эксплуатационным относятся все факторы, влияющие на надежность в процессе практического использования оптического кабеля (его прокладки, монтажа и последующей эксплуатации).

Деление на факторы условно, их можно также разделить на две основные группы: внутренние и внешние. Внутренние факторы зависят от причин, возникающих в процессе изготовления оптического волокна, оптического кабеля, проектирования ВОЛС, монтажа, эксплуатации и старения ОК. Внешние факторы не зависят от процесса изготовления и эксплуатации ОК. При-

чинами их являются, например, механические, климатические воздействия, токи молний (при наличии металлических элементов в ОК) и т.д.

Наибольшее число повреждений в ВОЛС, как и в традиционных кабельных линиях, происходит из-за механических воздействий, к которым относятся повреждения при работах, проводимых сторонними организациями, сотрясения и вибрация, растяжение под воздействием температуры, сдвиги почвы и т. д.

Причины повреждений весьма разнообразны; к ним могут относиться дефекты производства, монтажа, неправильная эксплуатация, пробой высоким напряжением (при наличии металла в ОК), повреждение грызунами, старение и т. д.

Ожидаемые величины показателей надежности (без учета фактора старения) приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Тип сети	Плотность повреждений (для 100 км)	Интенсивность отказов
Магистральная	0,24 ... 0,3	$2,74 \times 10^{-7} \dots 3,43 \times 10^{-7}$
Городская	12,5 ... 35	$1,43 \times 10^{-5} \dots 3,99 \times 10^{-5}$
Сельская	3,1 ... 5,45	$3,54 \times 10^{-6} \dots 6,22 \times 10^{-6}$

На основании статистических данных, полученных при эксплуатации традиционных кабельных линий связи, можно прогнозировать удельный вес различных повреждений для строящихся ВОЛС.

Для магистральных ВОЛС следует ожидать, что около 63% всех аварий вызовут земляные работы, производимые сторонними организациями, отказы из-за стихийных явлений (оползни, обвалы, осадки грунта, мерзлотные явления, паводки, ливни и др.) составят 25%. Аварии, вызванные браком при строительстве ВОЛС (некачественный монтаж муфт и др.), могут составить 6%, а аварии из-за прочих причин — 6%.

Повреждения без простоев связи будут в 5—7 раз чаще, чем отказы. Их распределение в процентном соотношении ожидается следующим: 42% — повреждения в муфтах; 19% — стихийные явления; 8% — земляные работы, производимые сторонними организациями; 8% — отступление от режима эксплуатации и дефектов производства; 8% — старение оболочек; 15% — прочие причины (грызуны, вибрация и т. д.).

Как и в традиционных кабельных линиях связи, в магистральных ВОЛС наиболее характерной неисправностью среди повреждений без простоя связи будет негерметичность. Ее процент ко всем неисправностям из-за повреждений составит порядка 70% (из них в муфтах — 80%).

Для городских ВОЛС следует ожидать, что 50% всех повреждений будет происходить из-за нарушения герметичности муфт и оболочек около муфт, более 20% из-за посторонних работ на трассе и порядка 30% повреждений будут вызваны другими причинами (растрескивание внешних оболочек и т. д.).

Для сельских ВОЛС следует ожидать 55% всех повреждений из-за земляных работ, производимых сторонними организациями, 23% из-за нарушения герметичности муфт и оболочек около муфт, 17% из-за повреждения кабелей грызунами и 5% из-за других причин.

Указанные выше процентные соотношения ожидаемой повреждаемости ВОЛС справедливы для оптических кабелей без металлических элементов. Если в оптическом кабеле присутствуют металлические элементы, то процентные соотношения причин повреждений следует ожидать такими же, как и в традиционных кабелях, имеющих пластмассовые оболочки. Для магистральных ВОЛС эти соотношения представлены в табл. 11.2. Для городских и

Таблица 112

Причина повреждения	Повреждаемость, %, магистральных линий связи	
	электрических	оптических
Земляные работы, производимые сторонними организациями	50	63
Стихийные явления (оползни, обвалы, паводки, ливни и др)	20	25
Гроза, влияние ЛЭП	19,5	—
Брак строительства	3,5	6
Прочие	7	6

сельских ВОЛС наличие металлических элементов в оптических кабелях незначительно изменит характер ожидаемого процентного распределения причин повреждений.

В указанные выше процентные соотношения не вошли повреждения из-за старения оптических волокон, их вероятность появления будет рассмотрена ниже.

11.3. Расчет показателей надежности

11.3.1. Особенности расчета показателей надежности

В волоконно-оптических линиях связи имеет место новый по сравнению с традиционными кабельными линиями связи внутренний источник отказов — обрывы ОВ, вызванные старением кварцевого стекла. Это предопределяет особенности расчета показателей надежности ВОЛС. При оценке срока службы ВОЛС следует учитывать возможность значительного увеличения затухания после восстановления связи.

Количественно надежность ВОЛС может быть выражена вероятностью безотказной работы, определяемой по формуле

$$P(t, L) = \exp \left[- \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n \bar{\Lambda}_i(t) L_i \right) dt \right].$$

где L_i — длина i -го участка (считается, что ВОЛС состоит из нескольких участков с одинаковыми условиями эксплуатации); T — промежуток времени, для которого определяется вероятность безотказной работы; $\bar{\Lambda}_i$ — интенсивность отказов для i -го участка.

Интенсивность отказов за определенный промежуток времени представляется суммой составляющих, обусловленных отказами из-за внешних факторов воздействия $\bar{\Lambda}_{вн}$, отказами муфт и сростков ОВ $\bar{\Lambda}_м$ и обрывами ОВ из-за старения стекла $\Lambda_{ст}$:

$$\bar{\Lambda}(t) = \bar{\Lambda}_{вн} + \bar{\Lambda}_м + \Lambda_{ст}(t).$$

Величины $\bar{\Lambda}_{вн}$ и $\bar{\Lambda}_м$ определяются исходя из опыта эксплуатации аналогичных кабельных линий связи (см. например, табл. 11.1). Для определения $\Lambda_{ст}$ необходимо рассмотреть процесс старения ОВ.

11.3.2. Расчет показателей надежности ОВ при его старении

Под старением понимается постепенное необратимое изменение передаточных и механических характеристик оптического кабеля. Когда эти изменения превысят допустимые нормы, кабель частично или полностью выйдет из строя.

Основной причиной старения является коррозия оптического волокна, под которой понимается разрушение ОВ при воздействии на него механического напряжения и влаги.

Теоретическая прочность материала оптического волокна значительно больше получаемой на практике и должна составлять 1/10 его модуля упругости E . Однако большинство волокон разрушается при напряжении $E/10^3 \dots E/10^2$. Большое влияние на прочность оказывает наличие микротрещин или дефектов на поверхности ОВ, которые служат источниками разрушения при напряжениях гораздо ниже теоретически допустимых.

Единичная микротрещина характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений $K_1 = \sigma Y \sqrt{c}$, где σ — величина приложенного к волокну механического напряжения; $Y \approx 1,13$ — безразмерный коэффициент, учитывающий геометрическую форму микротрещины; c — размер микротрещины.

Микротрещина образуется в два этапа. На первом этапе $K_1 < K_{1кр}$, где $K_{1кр}$ — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений. Для кварцевых оптических волокон $K_{1кр} = 0,789 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. На этом этапе происходит непрерывный рост микротрещины в соответствии с дифференциальным уравнением $dc/dt = AK_1^n$, где A — постоянная, зависящая от материала ОВ; n — постоянная, зависящая как от материала ОВ, так и от внешних условий (коэффициент коррозии).

На втором этапе $K_1 = K_{1кр}$ и рост микротрещины до полного рассеяния волокна происходит практически мгновенно (доли секунды).

Размеры микротрещины связаны с критической прочностью оптического волокна выражением $\sigma_{кр} = K_{1кр} / Y \sqrt{c}$.

Оптические волокна могут иметь большое количество микротрещин, вызванных технологическими причинами. Для определения прочности ОВ в зависимости от прикладываемых нагрузок используют функцию кумулятивной опасности обрыва $H(\sigma)$, которая представляет собой зависимость числа обрывов на единицу длины (обычно метр) от величины прикладываемых нагрузок. Кумулятивная опасность обрыва при динамических нагрузках описывается выражением $H(\sigma) = (\sigma/\theta)^r$. Функция кумулятивной опасности $H(\sigma)$ графически представляется в виде прямой в логарифмическом масштабе. Параметр r определяет степень наклона прямой, а θ — величину нагрузки, при которой происходит один обрыв на одном метре оптического волокна.

Любой обрыв при старении ОВ является результатом увеличения микротрещины. Уменьшение прочности ввиду наличия поверхностного дефекта определяется выражением

$$\sigma_0^{n-2} - \sigma_t^{n-2} = \frac{1}{B} \int_0^t [\sigma_a(\tau)]^n d\tau.$$

где σ_0 , σ_t — прочность ОВ с дефектом в моменты времени 0 и t соответственно; $\sigma_a(\tau)$ — функция, описывающая изменение во времени приложенной к ОВ механической нагрузки (на растяжение); B — постоянная, определяемая выражением $B = 2[AY^2(n-2)K_{1кр}^{n-2}]^{-1}$

Среднее число обрывов ОВ при воздействии неизменной во времени (статической) нагрузки $\sigma_{ст}$ находится из выражения

$$H(\sigma_{ст}, t) = \left(\frac{\sigma_{ст}}{\theta}\right)^r \left(1 + \frac{1}{B} \sigma_{ст}^2 t\right)^{\frac{r}{n-2}}.$$

В этом случае поток отказов из-за старения ОВ за промежутков времени t будет связан с кумулятивной опасностью выражением

$$\Lambda_{\sigma\tau}(t) = LH(\sigma_{\sigma\tau}, t),$$

где L — суммарная длина всех ОВ, м, находящихся на трассе ВОЛС, для которой рассчитывается надежность.

Если известен закон изменения нагрузки $\sigma_a(\tau)$, то функцию $H(\sigma, t)$ можно представить в виде

$$H(\sigma, t) = \left[\frac{\left(\sigma^{n-2} + (1/B) \int_0^t (\sigma_a(\tau))^n d\tau \right)^{\frac{1}{n-2}}}{\theta} \right]^r.$$

На старение также действует термофлуктуационный механизм разрушения. Это относительно медленный процесс, происходящий из-за разрыва химических связей между молекулами в вершине микротрещин под действием тепловых флуктуаций и напряжения растяжения. Если коррозионный механизм разрушения описывает разрушение, начинающееся с поверхности, то термофлуктуационный механизм описывает разрушение из-за дефектов, находящихся внутри волокна.

Вероятность безотказной работы ОВ при его разрушении за счет термофлуктуации можно описать выражением

$$P \approx \exp[-L\{D\sigma_1/\theta_1(Q - \ln T)\}^{r_1}],$$

где T — время приложения нагрузки σ_1 ; L — длина волокна; θ_1 , r_1 — параметры, аналогичные θ и r , только для внутренних дефектов; $D = UK_{1кр}$, где U и Q — константы материала.

Считается, что долговечность оптического волокна ограничивается любым из указанных механизмов разрушения (коррозионным или термофлуктуационным) в зависимости от их преобладания. При рассмотрении процесса старения ВОЛС следует основное внимание уделять коррозионному механизму разрушения ОВ, поскольку термофлуктуационный механизм действует только при условии, что поверхность ОВ не подвергается воздействию влаги, что для ВОЛС маловероятно.

11.4. Пути повышения эксплуатационной надежности ВОЛС

Мероприятия по повышению надежности ВОЛС необходимо проводить как в процессе разработки и изготовления кабеля, так и в процессе проектирования, строительства и эксплуатации кабельной линии. Чрезвычайно важными следует считать мероприятия при разработке и изготовлении кабеля, так как при недостаточно надежном кабеле не представляется возможным обеспечить надежную работу ВОЛС.

Мероприятия по повышению надежности при изготовлении заготовок ОВ. Так как причиной всех разрушений волокна являются микротрещины и дефекты, то основной задачей по повышению надежности на стадии изготовления заготовок ОВ является снижение вероятности попадания в них инородных частиц. Количество примесей и величина инородных частиц (молибдена, кальция, железа и т. д.) могут варьироваться в широких пределах. Снижение вероятности дефектов в заготовках ОВ достигается изменением технологии изготовления волокна.

Для уменьшения дефектов производят травление поверхности заготовки или же ее огненную полировку.

Рациональный выбор конструкции заготовки и материала также оказывают существенное влияние на надежность ОВ.

Мероприятия по повышению надежности при вытяжке волокна. Существенного уменьшения поверхностных дефектов добиваются за счет подбора условий вытяжки. К таким условиям можно отнести использование «малопы-

лящих» нагревателей, очистки воздуха в печи, выбор оптимальных температурных режимов и др.

Для защиты поверхности оптического волокна от абразивного действия микрочастиц его покрывают различными полимерными оболочками в процессе изготовления. Оптимальный выбор полимера, его толщины и способа наложения увеличивает среднее значение прочности волокна.

Одним из наиболее эффективных методов повышения надежности ОВ является их отбраковка путем приложения контрольной нагрузки, в несколько раз превышающей ожидаемое эксплуатационное растяжение. Используются различные способы приложения контрольной нагрузки на ОВ: волокна пропускают через систему роликов, задающих требуемое растяжение за счет изгиба, или перематывают под нагрузкой с одного барабана на другой. Целью контрольной нагрузки на ОВ является отбраковка волокон с поверхностными дефектами, имеющих прочность ниже определенного уровня. Волокна, прошедшие эти испытания, используются для изготовления кабелей. Отбраковка ОВ может быть совмещена с процессом их изготовления.

Процесс контрольной нагрузки на ОВ существенным образом изменяет статистическое распределение дефектов по длине волокна, что усложняет прогнозирование срока эксплуатации ВОЛС.

Зависимость от времени приложенной нагрузки при перемотке ОВ в процессе проверочных испытаний представлена на рис 11.1. В течение времени t_n нагрузка возрастает по линейному закону от нуля до максимальной величины $\sigma_{пер}$, затем в течение времени t_x остается неизменной, а затем уменьшается до нуля за время t_y также по линейному закону. Закон изменения прикладываемой нагрузки может быть записан следующим образом:

$$\int_0^t (\sigma_a(\tau))^n d\tau = \sigma_{пер}^n t_{экв}$$

где $t_{экв} = t_x + (t_n + t_y)/(n+1)$ — эквивалентное время перемотки. Из-за того, что нагрузка снимается не мгновенно, а за отрезок времени t_y , остается определенной вероятность повреждения волокна от старения при малых эксплуатационных нагрузках сразу после контрольной перемотки. Эта вероятность будет зависеть от комплекса вероятностно-временных параметров ОВ.

Если ОВ после проверочной перемотки подвергается воздействию статического напряжения σ_c в течение времени t , то кумулятивная опасность обрыва

$$H(\sigma, t) = \frac{1}{\theta^r} \left[\sigma^{n-2} + \frac{1}{B} (\sigma_{пер}^n t_{экв} + \sigma_c^n t) \right]^{r/(n-2)}$$

где σ — потенциально возможная нагрузка, большая, чем σ_c .

Например, если оптическое волокно имеет следующие параметры: $\theta = 10^{11}$ Па; $B = 0,01$ МПа²·с; $r = 2$; $n = 20$; $\sigma_{пер} = 400$ МПа; $\sigma_c = 100$ МПа; $t_{экв} = 0,1$ с, то через 25 лет при кратковременной нагрузке в 3 ГПа следует ожидать кумулятивную опасность

$$H = \frac{1}{(10^{11})^2} \left\{ (3 \cdot 10^9)^{20-2} + \frac{1}{0,01} [(400)^{20} \cdot 0,1 + (100)^{20} \cdot 7,89 \cdot 10^8] \right\}^{2/20-2} = 0,9 \cdot 10^{-9} \frac{1}{м}$$

Это означает, что следует ожидать девять обрывов в волокне длиной 10 км.

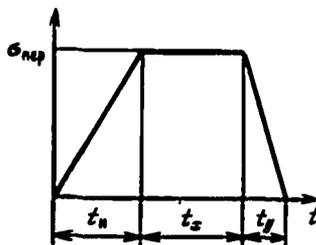


Рис. 11.1. Зависимость приложенной нагрузки от времени при перемотке ОВ

Среднее число обрывов ОВ при перемотке можно найти из выражения.

$$N_{\text{пер}} = \left(\frac{\sigma_{\text{пер}}}{\theta} \right)^r \left[\gamma + \frac{1}{B} \sigma_{\text{пер}}^2 t_{\text{экв}} \right]^{r/(n-2)}$$

где γ — коэффициент, учитывающий увеличение числа дефектов при снятии испытательного напряжения.

Кумулятивную опасность обрыва с учетом отбраковки при проверочных испытаниях определяют из выражения

$$N'(\sigma, t) = N_{\text{пер}} \left\{ \left[\frac{1 + \frac{t}{t_{\text{экв}}} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{\text{пер}}} \right)^n + \frac{B}{\sigma_{\text{пер}}^2 t_{\text{экв}}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{пер}}} \right)^{n-2}}{1 + C} \right]^{\frac{r}{n-2}} - 1 \right\}$$

где

$$C = \gamma B / (\sigma_{\text{пер}}^2 t_{\text{экв}});$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 - \frac{n-2}{n+1} \frac{t_y}{t_y^*}, & t_y < t_y^*, \\ \frac{3}{n+1} \left(\frac{t_y^*}{t_y} \right)^{\frac{n-2}{3}}, & t_y > t_y^*; \end{cases}$$

$t_y^* = \frac{(n-2)B}{\sigma_{\text{пер}}^2}$ — граничная величина времени снятия проверочной нагрузки.

На рис. 11.2 и 11.3 приведены зависимости кумулятивной опасности от величины перемоточного напряжения. Вероятностно-временные параметры имели следующие значения: $r=5$; $\theta=10$ ГПа; $n=25$; $B=10^{-3}$ МПа².с. Анализ

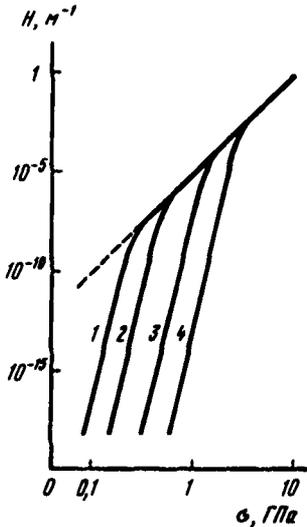


Рис. 11.2. Зависимость $H(\sigma)$, описывающая распределение прочности ОВ непосредственно после перемотки при $t_{\text{экв}}=1,01$ с и $\sigma_{\text{пер}}=0,1$ ГПа (кривая 1); 0,2 ГПа (кривая 2); 0,5 ГПа (кривая 3); 1,0 ГПа (кривая 4)

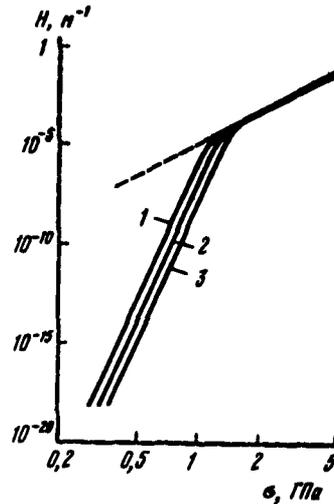
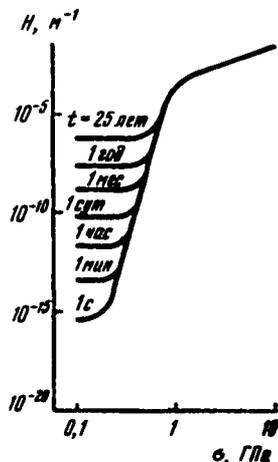


Рис. 11.3. Зависимость $H(\sigma)$, описывающая распределение прочности ОВ непосредственно после перемотки при $\sigma_{\text{пер}}=0,5$ ГПа и $t_{\text{экв}}=0,11$ с (кривая 1); 1,01 с (кривая 2); 10,01 с (кривая 3)

Рис. 11.4 Зависимость $N(\sigma)$, описывающая распределение прочности ОВ после проверочной перемотки в сочетании с последующей статической нагрузкой



приведенных зависимостей показывает, что отклонение от начального вейбулловского распределения прочности (штриховые прямые) имеет место в области малых значений σ , в которой наклон прямых не зависит от параметра исходного распределения r и определяется величиной $n=2$, характеризующей условие коррозии.

Увеличение нагрузки при перемотке ОВ в значительно большей степени влияет на отклонение распределения прочности, чем увеличение длительности перемотки, но вместе с тем сопровождается и значительным ростом числа обрывов (от $N_{пер}=0,021 \text{ км}^{-1}$ при $\sigma_{пер}=0,5 \text{ ГПа}$ до $N_{пер}=0,906 \text{ км}^{-1}$ при $\sigma_{пер}=1,0 \text{ ГПа}$).

Увеличение длительности перемотки от $t_{ккз}=0,11 \text{ с}$ до $t_{ккз}=10,01 \text{ с}$ сопровождается увеличением числа обрывов лишь от $N_{пер}=0,013 \text{ км}^{-1}$ до $N_{пер}=0,035 \text{ км}^{-1}$.

Зависимости, описывающие распределение прочности ОВ в случае последующего приложения статической нагрузки, приведены на рис. 11.4. Расчеты проводились для статической нагрузки $\sigma_c=0,1 \text{ ГПа}$, $t_n=t_y=0,1 \text{ с}$, $t_x=1 \text{ с}$ и времени выдерживания от 1 с до 25 лет. Воздействие статической нагрузки приводит к появлению горизонтальных участков, соответствующих ненулевой вероятности обрывов.

Мероприятия по повышению надежности при изготовлении оптического кабеля. Изготовление оптического кабеля является сложным технологическим процессом, сильно влияющим на его механические и передаточные характеристики, а также надежность ВОЛС. Поэтому оптимизация технологического процесса и конструирование ОК требуют учета многих факторов, чтобы одни характеристики не ухудшались за счет других.

Мероприятиями по повышению надежности при изготовлении ОК следует считать весь комплекс вопросов конструирования и технологии изготовления кабелей.

Для уменьшения влияния старения ОВ следует снижать нагрузки на ОВ как в самих конструкциях ОК, так и в процессе их изготовления. Следует также снижать воздействие влаги на ОВ путем использования гидрофобных наполнителей и влагонепроницаемых оболочек, так как попадание воды на ОВ, находящееся под механическим напряжением, может в 14—20 раз сократить время до его естественного разрушения за счет старения. Если при этом будет происходить перепад температуры относительно 0°С , то скорость разрушения ОВ возрастет.

Для повышения надежности ВОЛС можно использовать резервные волокна. Однако этот метод увеличения надежности следует использовать в случае, когда будет заметно влияние старения волокон, а сам кабель по ряду причин не будет подлежать ремонту (например, подводные ОК).

Обрыв одного волокна в результате старения не влечет за собой ухудшения передачи информации по другим волокнам, а приводит к нарушению работы только одной из систем передачи, работающей на данном кабеле. Поэтому при рассмотрении процессов старения ОК часто целесообразно рассматривать надежность работы пары ОВ, а не всего кабеля. При рассмотрении процесса старения оптического волокна надежность работы одной пары ОВ в оптическом кабеле без использования резервных волокон определяется по формуле

$$P_{\text{пары}} = p^{2n} + p^2 \sum_{i=1}^{2(n-1)} \binom{2(n-1)}{i} (1-p)^i p^{2(n-1)-i} + \\ + 2p(1-p) \sum_{j=1}^{2(n-1)} \binom{2(n-1)}{j} (1-p)^j p^{2(n-1)-j},$$

где n — число пар оптических волокон в оптическом кабеле; p — вероятность безотказной работы одного оптического волокна; $\binom{2(n-1)}{i}$; $\binom{2(n-1)}{j}$ — биномиальные коэффициенты $\left[\binom{N}{n} = \frac{N!}{(N-n)! n!} \right]$, J — коэффициент, принимающий нечетные значения.

Таким образом, при возникновении обрыва одного ОВ в кабеле без резервных волокон второе волокно в вышедшей из строя паре ОВ становится резервным и может быть использовано вместо любого последующего вышедшего из строя оптического волокна. Данное выражение позволяет определить вероятность безотказной работы без учета восстановления ОВ.

Например, надежность одной любой пары ОВ в 6-волоконном ОК без резервных волокон при $p=0,8$ будет

$$P_{\text{пары}} = p^{2 \cdot 3} + p^2 \sum_{i=1}^{2(3-1)} \binom{4}{i} (1-p)^i p^{4-i} + 2p(1-p) \sum_{j=1}^{2(3-1)} \binom{4}{j} (1-p)^j p^{4-j} = \\ = p^6 + 4(1-p)p^5 + 6(1-p)^2 p^4 + 4(1-p)^3 p^3 + \\ + (1-p)^4 p^2 + 8(1-p)^2 p^4 + 8(1-p)^4 p^2 = 0,779..$$

Надежность работы одной любой пары оптических волокон в оптическом кабеле с резервными волокнами определяется из выражения

$$P_{\text{рез. пары}} = \sum_{i=2n}^{2n+b} \binom{2n+b}{i} p^i (1-p)^{2n+b-i} + \\ + p^2 \sum_{j=b+1}^{2(n-1)+b} \binom{2(n-1)+b}{j} (1-p)^j p^{2(n-1)+b-j} + \\ + 2p(1-p) \sum_{\alpha=b+1}^{2(n-1)+b} \binom{2(n-1)+b}{\alpha} (1-p)^\alpha p^{2(n-1)+b-\alpha},$$

где b — число резервных волокон в оптическом кабеле; α — коэффициент, принимающий нечетные значения при четных значениях b и четные значения при нечетных значениях b .

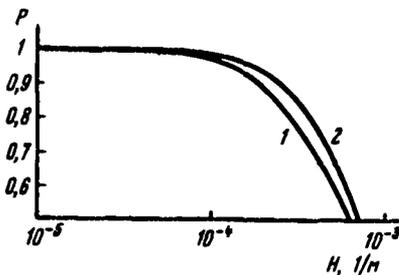


Рис. 11.5. Вероятность безотказной работы одной любой пары оптических волокон для 4-волоконного ОК с одним (кривая 1) и двумя (кривая 2) резервными волокнами

На рис. 11.5 представлены расчеты вероятности безотказной работы одной любой пары оптических волокон для четырехволоконного ОК с одним и двумя резервными волокнами.

Если рассматривать вероятность безотказной работы ОК при старении в целом (т. е. всех волокон), то можно пользоваться выражением $P_{OK} = p^{2n}$,

а при наличии резервных волокон
$$P'_{OK} = \sum_{i=2n}^{2n+b} \binom{2n+\delta}{i} p^i (1-p)^{2n+\delta-i}.$$

Мероприятия по повышению надежности при строительстве и эксплуатации ВОЛС. Как показывает практика эксплуатации зарубежных и отечественных ВОЛС, мероприятия по повышению надежности при строительстве и эксплуатации крайне необходимы, иначе все предыдущие мероприятия по повышению надежности окажутся неэффективными.

Как уже было сказано выше, существенное влияние на процесс старения оказывает влага, поэтому при строительстве и эксплуатации ВОЛС следует разработать ряд мер, исключающих или снижающих вероятность попадания влаги как в сам кабель, так и в соединительные муфты.

Для этих целей могут служить устройства поддержания избыточного давления в оптическом кабеле. Однако в большинстве случаев из-за малых размеров конструкций ОК такой способ повышения надежности ВОЛС реализовать не удастся. Широкое применение нашел метод повышения надежности ВОЛС за счет прокладки ОК в полимерные трубы. Трубы прокладывают в кабельную канализацию или укладывают в грунт и после затягивания в них ОК соединяют. Затем они могут содержаться под избыточным газовым давлением. При использовании такого метода надежность ВОЛС увеличивается, так как:

1) ВОЛС содержится под постоянным избыточным давлением с помощью штатного оборудования, используемого на традиционных кабельных линиях, что позволяет определять места негерметичности труб;

2) устраняется возможность повреждения ОК грызунами, так как большой диаметр труб снижает вероятность их разрушения;

3) уменьшается вероятность повреждения кабелей землеройными машинами из-за высокой прочности труб на разрыв. Так, при подхвате трубы с ОК рабочим органом ковшевого экскаватора резко возрастает нагрузка на силовую установку, что является предупреждением о попадании в рабочую зону ковша постороннего предмета. Как показала практика, в случае разрыва трубы оптический кабель, не повреждаясь, только вытягивается из трубопровода за счет свободной укладки ОК в трубе;

4) увеличивается в несколько раз величина допустимого раздавливающего усилия на ОК в полимерной трубе по сравнению с допустимым раздавливающим усилием на незащищенный кабель.

Использование полимерных труб возможно как при прокладке кабелей в городской телефонной канализации, так и при строительстве междугородных линий связи. В первом случае в телефонную канализацию вначале затягивают полимерные трубы, а затем в них затягивают ОК. Во втором случае возможно затягивание кабелей в полимерные трубы в стационарных условиях на заводах-изготовителях.

К мероприятиям по повышению надежности ВОЛС следует также отнести меры по увеличению надежности соединительных муфт путем контроля за технологическим процессом монтажа муфт. Для этого можно использовать методы неразрушающих испытаний: применение термоиндикаторных красок, контроль за процессами, связанными с расплавлением пластмассовых частей муфт (с помощью рентгеновских установок), контроль механической прочности сростков оптических волокон после сварки и др.

При испытании различных конструкций соединительных муфт образцы подвергают статическим нагрузкам, изгибам, вибрации, осевым растяжениям, кручению, смещению герметизирующих швов, проводят ударные испытания, имитирующие возможные воздействия на муфту камней или кусков

смерзшегося грунта при засылке котлована и др. Цикловые температурные испытания совмещают, как правило, с испытаниями на химическую стойкость в различных средах.

Кроме указанных выше специальных мероприятий, используют и такие традиционные методы повышения надежности кабельных линий связи, как увеличение глубины прокладки кабеля, использование грозозащитных тросов (при наличии металла в ОК) и т. д.

11.5. Определение срока службы ВОЛС

Определение срока службы ВОЛС является сложной задачей, так как необходимо ответить как минимум на три вопроса: сколько ежегодно будет повреждений на трассе, на сколько в результате этого возрастет затухание и сколько будут стоить восстановительные работы.

Одной из основных проблем долговечности ВОЛС является интенсивность старения элементов кабельной трассы (оптического волокна и соединительных муфт), так как от нее зависит поток массовых отказов на линии. Все остальные факторы в основном будут так же влиять на долговечность ВОЛС, как и на долговечность традиционных кабельных линий.

Срок службы основного элемента ВОЛС — оптического волокна, находящегося под эксплуатационной нагрузкой $\sigma_{\text{экс}}$ (величина нагрузки определяется геликондальной укладкой ОВ в кабеле), $T = 2 \left[(n-2) A \mu^n \sigma_{\text{экс}}^n C_{\text{max}}^{(n-2)/2} \right]^{-1}$,

где C_{max} — максимальный размер дефекта на поверхности волокна. Однако на практике этим выражением пользоваться нельзя, так как неизвестен максимальный размер дефектов. Кроме того, оптическое волокно подвергается перемотке, что существенным образом изменяет характер распределения дефектов в волокне. Для расчета срока службы оптического волокна, прошедшего перемотку, можно использовать выражение $T = B \sigma_{\text{пер}}^{n-2} / \sigma_{\text{экс}}^n$.

Например, при $B = 0,01 \text{ МПа}^2 \cdot \text{с}$, $\sigma_{\text{пер}} = 650 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{экс}} = 100 \text{ МПа}$ и $n = 20$ срок службы $T = 0,01 \cdot (650/100)^{20-2} / (100)^{20} = 13,6 \text{ лет}$.

На рис. 11.6 сплошными линиями представлены зависимости минимального срока службы ОВ, прошедших перемотку, от отношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ при $n = 20$, $B = 10^{-3} \text{ ГПа}^2 \cdot \text{с}$ и усилиях при перемотке $P_{\text{пер}} = 0,5$ (кривая 1) и 1,5 кг (кривая 2). Из рисунка следует, что для обеспечения 25-летнего срока службы оптического волокна необходимо, чтобы эксплуатационное напряжение на ОВ было в 6—7 раз меньше напряжения перемотки.

Допустив возможность разрушения ОВ с определенной вероятностью, можно снизить требование на проверочную нагрузку при перемотке. В этом случае срок службы волокна можно определить по формуле

$$T_F = \tau_{\text{пер}} (\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}})^n \left\{ [1 - \ln(1-F)] / (N_{\text{пер}} L) \right\}^{\frac{n-2}{r}} - 1,$$

где $\tau_{\text{пер}}$ — время нахождения волокна под нагрузкой при перемотке; F — вероятность обрыва волокна до истечения срока службы; $N_{\text{пер}}$ — среднее число обрывов волокна на единицу длины при перемотке под нагрузкой $\sigma_{\text{пер}}$; r — степень наклона функции кумулятивной опасности обрыва при значениях нагрузки, близких к $\sigma_{\text{пер}}$; L — длина волокна. Например, при $\sigma_{\text{пер}} = 400 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{экс}} = 100 \text{ МПа}$, $n = 20$, $r = 10$, $N_{\text{пер}} = 0,5 \frac{1}{\text{км}}$, $L = 1 \text{ км}$, $F = 10^{-4}$, $\tau_{\text{пер}} = 2 \text{ с}$, срок службы $T = 2 \cdot (400/100)^{20} \left((1 - \ln(1 - 10^{-4})) / (0,5 \cdot 1) \right)^{1,8} - 1 = 25 \text{ лет}$.

На рис. 11.6 штриховыми линиями (кривые 3—5) представлены зависимости срока службы ОВ от соотношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ для различных вероятностей обрыва. Исходные данные — типичные для световодов диаметром 125 мкм, изготовленных по технологии ИХАН—ИОФАН: натяжение перемотки 500 г, $\tau_{\text{пер}} = 2 \text{ с}$, $N_{\text{пер}} = 0,5 \text{ км}^{-1}$, $r = 10$, $L = 1 \text{ км}$, $n = 20$. Вероятность обрыва волокна до истечения срока службы $F = 10^{-2}$ (кривая 3), 10^{-3} (кривая 4) и 10^{-4} (кривая 5). Из графиков следует, что за 25 лет разрушится

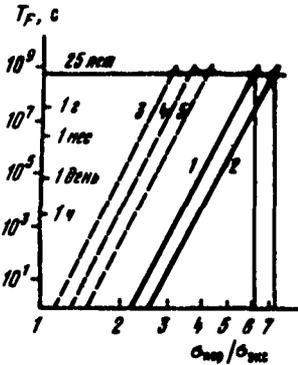


Рис. 11.6. Зависимость срока службы ОВ, прошедших перемотку, от отношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ при коррозионном процессе разрушения

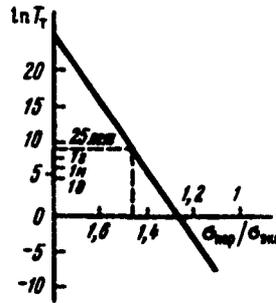


Рис. 11.7. Зависимость срока службы ОВ, прошедших перемотку, от отношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ при термофлуктуационном процессе разрушения

не более 1% волокон километровой длины, если отношение напряжения, действующего при перемотке, к рабочему напряжению будет равно трем. Если это отношение равно четырем, то за 25 лет следует ожидать обрыва не более 0,01% волокон километровой длины.

Однако следует учитывать, что указанные соотношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ рассматривались для вероятности обрыва только одного километра волокна. Для трассы ВОЛС длиной 100 км вероятность обрыва волокна из-за старения за счет коррозии следует ожидать значительно больше: $F_{\text{ВОЛС}} = 1 - p^L$, где p — вероятность целостности 1 км оптического волокна.

Для более точных расчетов срока службы волокна следует пользоваться выражением

$$T_F = \tau_{\text{экс}} \left(\frac{\sigma_{\text{пер}}}{\sigma_{\text{экс}}} \right)^n \left\{ (1 + C) \left[1 - \frac{\ln(1-F)}{LN_{\text{пер}}} \right]^{\frac{n-2}{r}} - \frac{B}{\sigma_{\text{пер}}^2 t_{\text{экс}}} \left(\frac{\sigma_{\text{экс}}}{\sigma_{\text{пер}}} \right)^{n-2} - 1 \right\}.$$

Усложнение расчетов возникает из-за того, что снятие нагрузки происходит не мгновенно, а за время t_y .

Срок службы оптических волокон, определяемый скоростью роста внутренних дефектов, описывается согласно термофлуктуационной теории выражением $T_T = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT]$, где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с — критическое время, определяемое частотой тепловых колебаний атомов; U_0 — энергия активации процесса, при отсутствии воды равная энергии межатомной связи (для связи Si—O $U_0 = 108$ ккал/моль); k — постоянная Больцмана; γ — константа, определяемая свойствами вещества и начальным размером дефекта.

Для волокна, прошедшего перемотку под натяжением $\sigma_{\text{пер}}$, срок службы находят из выражения $T_T = \tau_0 \exp[U_0/kT(1 - \sigma_{\text{экс}}/\sigma_{\text{пер}})]$.

На рис. 11.7 показан логарифм срока службы оптических волокон в зависимости от отношения $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ (температура считается равной 300 К). Как видно из этого рисунка, срок службы волокон становится меньше 25 лет вследствие термофлуктуационного роста дефектов, если отношение $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ меньше 1,4. Однако при таком значении $\sigma_{\text{пер}}/\sigma_{\text{экс}}$ срок службы волокна, определяемый ростом поверхностных дефектов в присутствии влаги, становится менее одного дня. Поэтому термофлуктуационный механизм роста дефектов может ограничивать срок службы волокон только при условии, что их поверхность не подвергнется воздействию влаги.

Перечень основных действующих документов по ВОЛС

1. ГОСТ 26599—85. Компоненты волоконно-оптических систем передачи.
2. ГОСТ 26.814—86. Кабели оптические. Методы измерения параметров.
3. ГОСТ 25462—82. Волоконная оптика. Термины и определения.
4. ТУ 16—705.425—86. Волокно оптическое.
5. ТХО.735.113.ТУ. Световоды кварцевые волоконные одномодовые.
6. ТУ 76.705.296—86. Кабели оптические (марки ОК-50) для городских линий связи.
7. ТУ 16.705.455—87 (для зоновой связи). Кабели оптические марки ОЗКГ-1.
8. ТУ 16.К71.018—88. Кабели оптические (марки ОМЗКГ) одномодовые для магистральных и внутризонных систем передачи
9. ТУ.446.001. Муфта междугородная для оптического кабеля связи ММОК АХПО.
10. ТУ.468.049. Муфта соединительная для оптического кабеля связи СМОК АХП.47.
11. ТУ.218.005. Гильза для защиты мест сварки световодов ГЭС АХП4.
12. ТУ.РФ4—074.001. Комплект деталей ТУ 4—87 для защиты места сварки волокон.
13. ТУ—ЛУ. АРБ М2.322.009. Комплект для сварки световодов мод КСС-111.
14. ТУ—ЛУ. АРБ М2.322.009. Комплект для сварки световодов мод КСС-121.
15. ТУ 4—87 АРФ1.223. Комплекс оборудования оконечных и промежуточных станций для волоконно-оптических городских линий связи.
16. ТУ 16.К71—79—90. Кабели оптические (марки ОКЛ) одномодовые для линий передачи ЕАСС на длине волны 1,55 мкм.
17. Инструкция по проектированию линейно-кабельных сооружений связи ВСН-116.— М.: Гидросвязь, 1987.
18. Исходные данные (предварительные) систем передачи «Сопка-2» и «Сопка-3» НП.1.226—1—87.— М.: Гидросвязь, 1987.
19. Исходные данные по применению волоконно-оптических систем передачи «Соната-2» при проектировании ГТС.— М.: ЦНИИС, 1987.
20. Исходные данные по применению систем передачи «Сопка-4».— М.: ЦНИИС, 1987.
21. Руководство по прокладке, монтажу и сдаче в эксплуатацию волоконно-оптических линий связи ГТС (Линейно-кабельные сооружения).— М.: ССКТБ, 1987.
22. Руководство по прокладке, монтажу и сдаче в эксплуатацию волоконно-оптических линий связи внутризонных сетей (Линейно-кабельные сооружения).— М.: ССКТБ, 1987.
23. Рекомендации по монтажу соединительных муфт на оптическом кабеле связи марки ОКЛ-50-2-0,7-1,5-4.— М.: ССКТБ, 1986.
24. Руководство по монтажу, настройке, паспортизации и приемке в эксплуатацию аппаратуры «Соната».— М.: ССКТБ, 1989.
25. Временное руководство по строительству и эксплуатации оборудования ливейных трактов ВОЛС, оснащенных аппаратурой «Сопка-2» и «Сопка-3».— М.: ССКТБ, 1989.

26. Временное руководство по строительству и эксплуатации оборудования линейных трактов ВОЛС, оснащенных аппаратурой «Сопка-4».— М.: ССКТБ, 1989.
27. ТК на прокладку оптического кабеля ГТС в кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1986.
28. ТК на прокладку оптических кабелей связи внутризоновых сетей.— М.: ССКТБ, 1986.
29. ТК на монтаж соединительной муфты СМОК оптического кабеля ГТС.— М.: ССКТБ, 1986.
30. ТК на монтаж соединительной муфты внутризонового оптического кабеля «Калибр».— М.: ССКТБ, 1986.
31. ТК проведения входного контроля ОК на кабельной площадке.— М.: ССКТБ, 1988.
32. КТП на монтаж соединительной муфты оптического кабеля марки ОКЛ-50-2-0,7-1,5-4, прокладываемого в кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1986.
33. КТП заготовки ПЭТ трубы линейной проволоки (тросом) для прокладки в ней ОК.— М.: ССКТБ, 1987.
34. КТП заготовки канала кабельной канализации ПЭТ для прокладки в нем ОК связи.— М.: ССКТБ, 1987.
35. КТП на установку наконечника с чулком на конец ОК перед прокладкой в кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1987.
36. КТП на сварку ОВ ОК связи.— М.: ССКТБ, 1987.
37. КГП стыковки миллиметровых длин ПЭТ ПВД ЗЭ П для прокладки в канале кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1987.
38. КТП герметизации конца ОК ПЭ колпачками.— М.: ССКТБ, 1986.
39. КТП установки чулка на оптический кабель марки ОЗКГ-1 перед прокладкой в кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1986.
40. КТП подготовки оптического кабеля для прокладки механизированным способом под оптическим контролем.— М.: ССКТБ, 1987.
41. КТП оснастки конца оптического внутризонового кабеля ОЗКГ-1 для прокладки в кабельной канализации.— М.: ССКТБ, 1986.
42. ТЕ 24-1-87-Х(1). Приклеивание скреп для прокладки кабеля по стенам.
43. ТЕ 24-1-87-ХII(7). Монтаж прямых муфт оптических кабелей связи.
44. ТЕ 24-1-88-II(6). Протягивание оптических кабелей в трубопроводе.
45. ТЕ 24-1-88-I(8). Прокладка, монтаж и измерения оптических кабелей связи типа ОЗКГ (8 волокон).
46. ТУ 16.К71.79—90. Кабели оптические для прокладки в городской канализации (ОКК).
47. ТУ 16.К71.084—90. Кабели оптические линейные для магистральной связи (ОКЛ).

Расчет параметров оптических кабелей

Одномодовый кабель

Исходные данные сердцевина $2a=10$ мкм; оболочка $2b=125$ мкм; показателя преломления $n_1=1,51$, $n_2=1,5$; длина волны $\lambda=1,55$ мкм; длина линии $l=30$ км; ширина спектральной линии лазера 2 нм.

1. Относительное значение показателей преломления

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = (1,51 - 1,5)/1,51 = 0,007.$$

2. Числовая апертура

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 0,263.$$

3. Нормированная частота

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{1,55 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 0,5.$$

4. Критическая частота (для одномодовой передачи $P_{nm} \approx 2,405$)

$$f_c = \frac{P_{nm} c_0}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{2,405 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2}} = 9,2 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

5. Критическая длина волны

$$\lambda_c = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2,405 \cdot 1,51} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 2,27 \text{ мкм.}$$

6. Потери энергии на поглощение

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,51}{1,55 \cdot 10^{-6}} \cdot 2 \cdot 10^{-11} = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{ или } 0,53 \text{ дБ/км.}$$

7. Потери на рассеяние

$$\alpha_p = K_p/\lambda^4 = 1,3/1,55^4 = 0,224 \text{ дБ/км.}$$

8. Общие потери

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p = 0,53 + 0,224 = 0,754 \text{ дБ/км.}$$

9. Потери в инфракрасном диапазоне (при $\lambda=2$ мкм)

$$\alpha_{ик} = C_{ик} e^{-k/\lambda} = 0,9 e^{-\frac{0,8 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-6}}} = 0,6 \text{ дБ/км.}$$

10. Волноводная дисперсия

$$\tau_{вв} = \Delta \lambda / B(\lambda) = 2 \cdot 30 \cdot 12 \cdot 10^{-12} = 720 \text{ нс/(нм} \cdot \text{км)}$$

для лазера ширина спектральной линии 2 нм.

11. Материальная дисперсия

$$\tau_{мат} = \Delta \lambda / M(\lambda) = 2 \cdot 30 \cdot (-20) \cdot 10^{-12} = -1200 \text{ нс/(нм} \cdot \text{км)}.$$

12. Результирующая дисперсия

$$\tau_{рез} = \tau_{вв} + \tau_{мат} = 720 - 1200 = -480 \text{ нс/(нм} \cdot \text{км)}.$$

13. Пропускная способность

$$\Delta F = 1/\tau = 1/(480 \cdot 10^{-12}) = 2,1 \text{ ГГц.}$$

14. Границы изменения фазовой скорости

$$c_0/n_1 = (3 \cdot 10^8)/1,51 \approx 198 \text{ 000 км/с; } c_0/n_2 = 3 \cdot 10^8/1,5 \approx 200 \text{ 000 км/с.}$$

15. Границы изменения волнового сопротивления

$$Z_0/n_1 = 376,7/1,51 = 249,5 \text{ Ом}; \quad Z_0/n_2 = 376,1,5 = 252 \text{ Ом.}$$

Многомодовый кабель

Исходные данные: сердечник $2a = 50$ мкм; оболочка $2b = 125$ мкм; показатели преломления $n_1 = 1,53$, $n_2 = 1,5$; длина волны $\lambda = 1,3$ мкм.

1. Относительное значение показателей преломления

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = (1,53 - 1,5)/1,53 = 0,02.$$

2. Числовая апертура $\Delta N = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 0,3$.

3. Нормированная частота

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 36.$$

4. Число волн (мод) $N = V^2/2 = 36^2/2 = 648$.

5. Критическая частота ($P_{nm} = 3,83$)

$$f_0 = \frac{P_{nm} \cdot c_0}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,83 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2}} = 2,53 \cdot 10^{12} \text{ Гц.}$$

6. Критическая длина волны $\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 8 \text{ мкм.}$

7. Потери энергии на поглощение

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\pi} = 8,69 \frac{3,14}{1,3 \cdot 10^{-6}} \cdot 5 \cdot 10^{11} \cdot 1,53 = 1,6 \text{ дБ/км.}$$

8. Потери на рассеяние $\lambda_p = K_p/\lambda^4 = 1,5/1,3^4 = 0,52 \text{ дБ/км.}$

9. Общие потери $\alpha = \alpha_n + \alpha_p = 1,6 + 0,52 = 2,12 \text{ дБ/км.}$

10. Потери в инфракрасном диапазоне (при $\lambda = 2$ мкм)

$$\alpha_{ик} = C_{ик} e^{-\frac{K_{ик}}{\lambda}} = 0,3 e^{-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}}} = 0,2 \text{ дБ/км.}$$

11. Дисперсия ступенчатого световода ($l = 10$ км)

$$\tau = \frac{n_1 \Delta l}{c_0} = \frac{1,53 \cdot 0,02 \cdot 10}{3 \cdot 10^8} = 1020 \text{ нс/(нм} \cdot \text{км).}$$

12. Полоса пропускания $\Delta F = 1/\tau = 1/1020 \approx 1 \text{ МГц.}$

13. Дисперсия градиентного световода ($l = 10$ км)

$$\tau = \frac{n_1 \Delta^2 l}{2c_0} = \frac{1,53 \cdot (0,02)^2 \cdot 10}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} = 10,2 \text{ нс/(нм} \cdot \text{км).}$$

14. Полоса пропускания $\Delta F = 1/\tau = 1/10 = 100 \text{ МГц.}$

15. Границы изменения фазовой скорости

$$c_0/n_1 = 3 \cdot 10^8/1,53 = 196 \text{ 000 км/с}; \quad c_0/n_2 = 3 \cdot 10^8/1,5 = 200 \text{ 000 км/с.}$$

16. Границы изменения волнового сопротивления

$$Z_0/n_1 = 376,7/1,53 = 247 \text{ Ом}; \quad Z_0/n_2 = 376,7/1,5 = 252 \text{ Ом.}$$

Список литературы

1. Гроднев И. И. Волоконно-оптические линии связи.— М.: Радио и связь, 1990.— 224 с.
2. Семенов Н. А. Оптические кабели связи. Теория и расчет.— М.: Радио и связь, 1981.— 152 с.
3. Мидвинтер Дж. Э. Волоконные световоды для передачи информации.— М.: Радио и связь, 1983.— 336 с.
4. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов.— М.: Мир, 1984.— 512 с.
5. Гроднев И. И., Ларин Ю. Т., Теумин И. И. Оптические кабели.— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 264 с.
6. Максимов В. И. Прокладка оптических кабелей связи.— М.: Информ-связь, 1987.— № 2.— 48 с.
7. Оптика и связь / А. Козане, Ж. Флере, Г. Мэтр и др.: Пер. с франц.— М.: Мир, 1984.— 504 с.
8. Панкратов В. Г., Морозов Б. Н. Методические указания по курсу линии связи.— М.: МИС, 1990.— 26 с.
9. Мурадян А. Г., Гольдфарб Н. С., Иноземцев В. П. Оптические кабели многоканальной связи.— М.: Радио и связь, 1987.— 200 с.
10. Волоконная оптика и приборостроение. / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, Б. П. Оробинский и др.— Л.: Машиностроение, 1987.— 328 с.
11. Волоконно-оптические линии связи: Справочник / Л. М. Андрушко, В. А. Вознесенский, В. Б. Каток и др.— Киев: Техника, 1988.— 240 с.
12. Теумин И. И. Волноводы оптической связи.— М.: Связь, 1978.— 168 с.
13. Транссоветская линия волоконно-оптической связи (ТСЛ) и глобальное цифровое кольцо связи / Г. Г. Кудрявцев, Л. Е. Варакин, П. С. Кураков. Электросвязь.— 1990.— № 10.— С. 3—8.
14. Верник С. М., Гитин В. Я., Иванов В. С. Оптические кабели связи.— М.: Радио и связь, 1988.— 144 с.
15. Гроднев И. И., Верник С. М. Линии связи.— М.: Радио и связь, 1988.— 544 с.
16. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ.— М.: Радио и связь, 1987.— 656 с.
17. Унгер Г. Г. Планырные и волоконные оптические волноводы.— М.: Мир, 1981.— 516 с.
18. Кронгауз И. А., Лезова Л. А. Опыт прокладки и монтажа ВОЛС в Москве // Электросвязь.— 1988.— № 3.— С. 8—10.
19. Хабибулин В. М. Ультразвуковой телеискатель // Вестник связи.— 1980. № 8.— С. 2; 21.
20. Хабибулин В. М., Хабибулина Г. И. Оценка надежности сростков градиентных волокон. // Электросвязь.— 1990.— № 12.— С. 20—22.
21. Визель А. А. Системы связи по световодным кабелям // Итоги науки и техники. Сер. Электросвязь / ВИНТИ.— 1985.— Т. 15 — С. 178—259.
22. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника.— М.: Радио и связь, 1989 — 360 с.
23. Основы оптоэлектроники: Пер. с япон.— М.: Мир, 1988.— 288 с.
24. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. / Под ред. А. И. Ларкина.— М.: Радио и связь, 1988.— 504 с.
25. Прохоров О. Н. Сигналы и коды цифровых систем передачи // Электро-связь.— 1980.— № 1.— С. 33—37.

Оглавление

Предисловие	3
Перечень принятых сокращений	4
Глава 1. Основные сведения о волоконно-оптической связи	6
1.1. Развитие волоконно-оптической связи	6
1.2. Структурная схема волоконно-оптической связи	7
1.3. Достоинства и недостатки оптических кабелей	9
1.4. Техничко-экономическая эффективность оптических кабелей	9
Глава 2. Основы передачи информации по оптическим кабелям	11
2.1. Физические процессы в волоконных световодах	11
2.2. Волновая и лучевая трактовка световых процессов	13
2.3. Типы волоконных световодов и принцип их действия	15
2.4. Апертура волоконного световода	16
2.5. Основное уравнение передачи	17
2.6. Критические длины волн и частоты	18
2.7. Нормированная частота	20
2.8. Число мод	21
2.9. Типы волн в световоде	21
2.10. Затухание	22
2.11. Дисперсия	26
2.12. Пропускная способность и дальность связи	32
2.13. Коэффициент распространения, скорость передачи по световоду и волновое сопротивление	33
Глава 3. Оптические волокна и кабели	36
3.1. Рекомендации МККТТ по характеристикам оптических волокон	36
3.2. Классификация оптических волокон	37
3.3. Многомодовые оптические волокна	38
3.4. Одномодовые оптические волокна	38
3.5. Изготовление оптических волокон	41
3.6. Классификация оптических кабелей связи	43
3.7. Типы и конструкции оптических кабелей связи	43
3.8. Оптические кабели городской связи ОК-50	45
3.9. Оптические кабели городской связи ОКК	47
3.10. Оптические кабели зоновой связи	51
3.11. Оптические кабели магистральной связи ОМЗКГ	53
3.12. Оптические кабели магистральной связи ОКЛ	57
3.13. Оптические кабели сельской связи	62
3.14. Зарубежные конструкции оптических кабелей	63
Глава 4. Оптоэлектронные и оптические компоненты ВОСП	68
4.1. Источники оптического излучения	68
4.2. Фотоприемники	78
4.3. Передающие и приемные оптоэлектронные модули	85
4.4. Оптические компоненты	90

Глава 5. Коды для ВОСП	99
51. Основные определения и требования к кодам	99
52 Основные параметры кодов	101
53 Классификация кодов	103
54 Алгоритмы формирования кодов	105
541 Безызбыточные коды и коды класса 1В2В	105
542 Коды класса пВпВ	108
543 Коды со вставками (дополнительным вводом)	110
55 Анализ, сравнение и выбор кодов	112
Глава 6 Волоконно-оптические системы передачи	118
61 Общие принципы построения ВОСП	118
62 Технические характеристики отечественных ВОСП для соединительных линий ГТС	123
63 Технические характеристики отечественных ВОСП для внутризональных сетей	127
64 Технические характеристики ВОСП для магистральной сети	130
65 Системы передачи второго поколения	131
651 Общие сведения	131
652 ВОСП для городской сети ИКМ-480 5	131
653 ВОСП для внутризональной сети «Сопка-3М»	132
654 ВОСП для магистральных линий связи «Сопка-4М» и «Сопка-5»	134
Глава 7 Аппаратура волоконно-оптических систем передачи	137
71 Принципы построения аппаратуры ВОСП	137
72 Аппаратура ВОСП для соединительных линий ГТС	143
721 Аппаратура «Соната-2»	143
722 Аппаратура ИКМ-120 5	149
73 Аппаратура ВОСП для внутризональных сетей	153
74 Аппаратура ВОСП для магистральных линий связи	157
Глава 8 Измерения	161
81 Назначение и виды измерений	161
82 Измерение параметров и характеристик оптических кабелей	162
821 Измерение затухания	162
822 Измерение полосы пропускания и дисперсии	165
823 Измерение длины волны отсечки	166
824 Измерение профиля показателя преломления	167
825 Измерение числовой апертуры	168
826 Измерение диаметра модового поля одномодовых кабелей	168
827 Измерение переходного затухания	169
828 Измерение геометрических и механических характеристик ОК	169
829 Определение места и характера повреждения ОК	170
83 Измерение характеристик волоконно-оптических трактов и аппаратуры ВОСП	171
831 Измерение коэффициента ошибок	171
832 Измерение энергетического потенциала и чувствительности фотоприемного устройства	172
833 Измерение уровней оптической мощности	173
84 Состав измерений и испытаний	173
85 Измерительные приборы	175
Глава 9 Проектирование волоконно-оптических линий связи	192
91 Общие сведения	192
92 Топология сети	192
93 Выбор трассы прокладки кабельной линии	194

9.4. Выбор ВОСП и кабелей	196
9.5. Электропитание ВОЛС и длины регенерационных участков	197
9.6. Техничко-экономическое обоснование эффективности ВОЛС	199
Глава 10. Строительство ВОЛС	203
10.1. Особенности строительства ВОЛС	203
10.2. Подготовка к строительству ВОЛС	205
10.3. Входной контроль ОК	208
10.4. Прокладка ОК в грунт	210
10.5. Прокладка ОК в телефонной канализации	218
10.5.1. Особенности прокладки ОК в канализации	218
10.5.2. Заготовка каналов кабельной канализации	219
10.5.3. Растягивающие усилия, действующие на ОК при прокладке в телефонной канализации	222
10.5.4. Механизмы и приспособления для прокладки ОК	226
10.5.5. Прокладка ОК в телефонной канализации	226
10.6. Монтаж оптических кабелей	226
10.6.1. Особенности монтажа ОК	226
10.6.2. Факторы, влияющие на затухание сростков ОБ	228
10.6.3. Особенности аппаратуры для сращивания одномодовых и многомодовых ОБ	229
10.6.4. Контроль качества сростков ОБ	231
10.6.5. Конструкции соединительных муфт	234
10.6.6. Оборудование вводов и монтаж оконечных устройств	237
10.6.7. Основные материалы для монтажа ОК и условия их применения	241
10.6.8. Оценка трудоемкости монтажных работ на ВОЛС	244
10.7. Техника безопасности	245
Глава 11. Надежность волоконно-оптических линий связи	245
11.1. Основные понятия, параметры надежности	245
11.2. Основные факторы, влияющие на надежность	246
11.3. Расчет показателей надежности	248
11.3.1. Особенности расчета показателей надежности	248
11.3.2. Расчет показателей надежности ОБ при его старении	249
11.4. Пути повышения эксплуатационной надежности ВОЛС	250
11.5. Определение срока службы ВОЛС	256
Приложения	258
Список литературы	262