

# **МИНИСТЕРСТВО РФ ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

## **Поволжская Государственная академия телекоммуникаций и информатики**

Кафедра линий связи и измерений в технике связи

### **Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи**

Рекомендовано УМО по образованию в области телекоммуникаций в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 071700 – Физика и техника оптической связи, 200900 – Сети связи и системы коммутации, 201000 – Многоканальные телекоммуникационные системы.

Составили: к.т.н., доц. Бурдин А.В.  
д.т.н., проф. Бурдин В.А.  
к.т.н., доц. Воронков А.В.  
к.т.н., доц. Шишова Н.А.

Самара – 2004

## 1. Постановка задачи

Задачей данной работы является исследование бюджета мощности волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), работающей по одномодовому ступенчатому оптическому волокну (ОВ) на одной оптической несущей, без чирпа, на регенерационном участке (РУ) без линейных оптических усилителей (ОУ) и компенсаторов дисперсии. В процессе выполнения задания необходимо определить длину регенерационного участка (РУ) для заданных параметров волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), рассчитать зависимость бюджета мощности от скорости передачи информации в линии и определить максимально допустимую скорость передачи для данного РУ.

## 2. Исходные данные

Исходными данными для решения поставленной задачи являются тип ОВ и параметры волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), к которым относятся скорость передачи линейной кодовой последовательности, уровень мощности оптического излучения лазера, центральная длина волны и ширина линии излучения лазера, уровень чувствительности приемника, полоса пропускания приемника.

Исходные данные к **индивидуальному** заданию определяются следующим образом.

Скорость передачи в оптической линии на первом этапе принимается равной  $B = 155$  Мбит/с, что соответствует STM-1 оптической системы передачи синхронной цифровой иерархии (SDH).

Уровень мощности оптического излучения лазера определяется как

$$P_0 = \frac{6 \cdot m}{10} - 1, \text{ дБм} \quad (1)$$

Уровень чувствительности приемника определяется как

$$p_R = -34 + \frac{22 \cdot n}{10}, \text{ дБм} \quad (2)$$

Таблица 1

Номер зачетной книжки		
Последняя цифра номера зачетной книжки	<i>n</i>	
Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	<i>m</i>	
Число, составленное из двух последних цифр номера зачетной книжки	<i>mn</i>	
Сумма всех цифр номера зачетной книжки	<i>Sum</i>	
<b>Наименование параметра</b>		
<b>Условное обозначение</b>		
<b>Значение</b>		
Скорость передачи в линии	<i>B</i> , Мбит/с	155
Уровень мощности оптического излучения лазера	<i>p<sub>0</sub></i> , дБм	
Уровень чувствительности приемника	<i>p<sub>R</sub></i> , дБм	
Центральная длина волны	$\lambda_C$ , нм	
Ширина линии излучения лазера	$\Delta\lambda$ , нм	
Марка ОВ		

Для определения центральной длины волны следует воспользоваться следующей формулой:

$$\lambda_C = 1260 + \frac{415 \cdot mn}{100}, \text{ нм} \quad (3)$$

При этом ширина линии излучения лазера определяется следующим образом:

$$\Delta\lambda = \begin{cases} 2 + s & , (p_0 - p_R) < 20 \\ 0,1 \cdot (2 + s) & , (p_0 - p_R) \geq 20 \end{cases} \quad (4)$$

$$s = \begin{cases} 1 & , Sum - \text{четное число} \\ -1 & , Sum - \text{нечетное число} \end{cases}$$

Здесь *Sum* – сумма всех цифр номера зачетной книжки.

Тип одномодового ступенчатого оптического волокна следует выбирать самостоятельно из волокон, данные которых представлены в Приложении 1 к настоящим методическим указаниям.

Результаты выбора исходных данных занесите в таблицу 1.

### **3. Основы функционирования волоконно-оптических линий передачи**

#### **3.1 Обобщенная структурная схема волоконно-оптических систем передачи**

Обобщенная структурная схема РУ волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) без устройств компенсации и линейных усилителей представлена на рис.1 [1]. Приведен пример оптической системы передачи работающей на одной оптической несущей, без чирпа (с внешним модулятором) и прямым детектированием.

*Передатчик ВОСП* обеспечивает преобразование входного электрического (цифрового или аналогового) сигнала в выходной световой (цифровой или аналоговый) сигнал. Скорость передачи в линии современных систем синхронной цифровой иерархии составляет 2,5 -10 Гбит/с и более. Соответственно длительность импульса источника оптического излучения не долж-

на превышать 0,2 – 0,05 нс. Это требует применения когерентных источников излучения – лазеров.

В общем случае передатчик включает в себя лазерный диод (ЛД), модулятор (М) и кодек, на который поступает кодовая последовательность от цифровой системы передачи (ЦСП).

*Модулятор* производит модуляцию генерируемой лазером оптической несущей.

*Кодек* осуществляет преобразование кода ЦСП (аналогового сигнала) в линейный код оптической системы передачи и обратно.

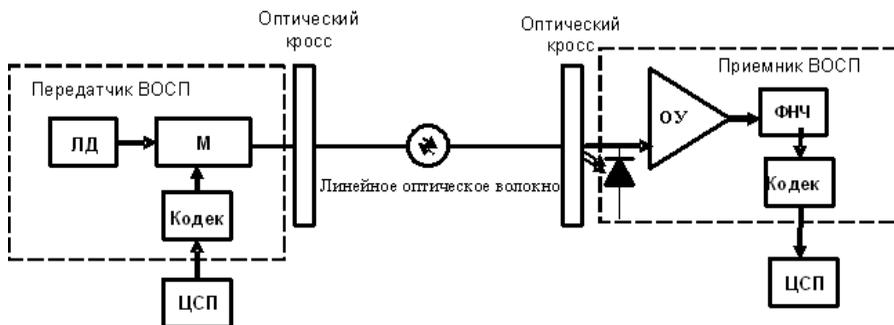


Рис.1. Упрощенная структурная схема ВОСП.

*Приемник ВОСП* осуществляет обратное преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока. Он включает в себя фотодиод (ФД), оптический усилитель (ОУ), фильтр нижних частот (ФНЧ) и кодек. Основным элементом – ФД. Применяются р-і-п или лавинные фотодиоды, имеющие очень малую инерционность.

*Оптический кросс* служит для оперативного соединения и разъединения оптических волокон станционных и линейных оптических кабелей в процессе технической эксплуатации ВОЛП.

### 3.2 Основы линейного кодирования

Полученный в результате квантования и двоичного кодирования цифровой поток оптимален с точки зрения ошибок квантования, но требует оптимизации для передачи по каналу связи. Это обусловлено в основном следующими причинами:

- широкий спектр цифрового потока затрудняет как передачу его по каналу связи с ограниченной полосой пропускания, так и обеспечение, и, особенно, восстановление синхронизации;
- спектр сигнала имеет значительную долю низкочастотных составляющих, которые могут интерферировать с составляющими передаваемого низкочастотного сигнала;
- спектр содержит большую постоянную составляющую, что осложняет фильтрацию напряжения сети питания.

Чтобы оптимизировать спектр сигнала для передачи в линии необходимо обеспечить:

- минимальную спектральную плотность на нулевой частоте и ее ограничение на нижних частотах;
- информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала в виде дискретной составляющей, легко выделяемой на фоне непрерывной части спектра;
- достаточно узкополосный непрерывный спектр для передачи сигнала в линии без искажений;
- малую избыточность, для снижения относительной скорости передачи в линии;
- минимально возможные длины блоков повторяющихся символов - «1» или «0», - и равенство числа единиц и нулей в кодовых комбинациях (диспаратность).

Задачи оптимизации сигнала для прохождения через устройство сопряжения с линией (интерфейс) и по линии решают интерфейсное кодирование и линейное кодирование.

Для двоичного кодирования число уровней входного сигнала  $m=2$ , а число уровней выходного сигнала  $n$  может быть равно  $n=2$  (двухуровневое кодирование) или  $n=3$  (трехуровневое кодирование). При этом кодирование может быть как одно-

полярным, так и двухполярным. В различных методах кодирования «1» может быть представлена как положительным прямоугольным импульсом на полную длину или половину длины двоичного интервала, так и переходом с «+1» на «0» или «-1» в центре интервала. При этом «0» может быть представлен отрицательным импульсом, соответствующей длины, отсутствием импульса, или обратным переходом с «-1» или «0» на «+1» в центре интервала.

Для ограничения длины блоков повторяющихся символов типа «11..11» или «00..00» используется инверсия полярности импульсов регулярной кодовой последовательности или вставки, позволяющие сохранить соотношение числа нулей и единиц (паритет) кодовой комбинации.

Наиболее распространенный интерфейсный код – HDB3 (High-Density Bipolar code of order 3). Это двухполярный код высокой плотности порядка 3. Код с инверсией на «1», в котором каждый блок «0000» заменяется на блок «В00V». Здесь «V» - инвертированный импульс, а «В» – вставка импульса, выполняемая так, чтобы число «В» импульсов между последовательными «V» импульсами было нечетным.

Широко применяются следующие коды.

Код RZ (Return to Zero). Это основополагающий трехуровневый код с возвращением к нулю.

Код NRZ (Non Return to Zero). Это основополагающий двухуровневый код без возвращения к нулю. Он может быть как однополярным, так и двухполярным.

Блочные коды типа mBnB. Здесь m – длина (в битах) блоков, на которые разбивается исходная последовательность, а n – соответствующая им длина ( в битах) блоков, составленных из кодовых символов ( $n > m$ ). При использовании блочных кодов скорость передачи в линии в  $n/m$  раз больше скорости передачи исходной кодовой последовательности.

Указанные коды могут быть использованы и как интерфейсные и как линейные. При этом, если в случае использования в качестве направляющей среды электрических цепей (сим-

метричные или коаксиальные пары), радиоканалов интерфейсные и линейные коды могут совпадать, то в случае волоконно-оптических линий передачи – нет. В оптических направляющих системах невозможно непосредственно использовать биполярные коды. Поэтому, при передаче цифрового потока по оптическому волокну интерфейсный код должен быть конвертирован в линейный код, обеспечивающий оптимальную передачу сигналов в оптической линии.

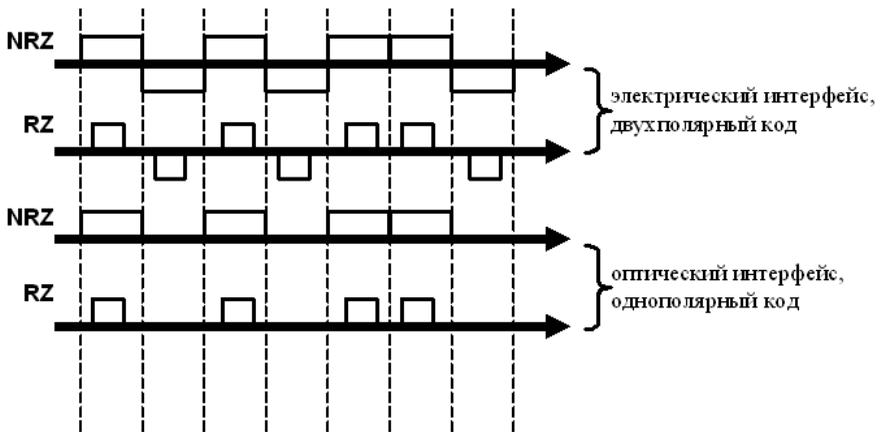


Рис. 2. Двухполярные и однополярные линейные коды.

В оптических системах передачи используют, как правило, однополярные блочные коды. Это могут быть как варианты кода RZ, так и кода NRZ. Например, как показано на рис.2. Основное преимущество кодов NRZ по сравнению с кодами RZ – примерно вдвое меньшая полоса частот модулированного сигнала. Однако наличие в исходном коде длинных последовательностей нулей или единиц существенно ухудшают условия приема постоянной составляющей. Ухудшаются условия восстановления синхронизации. При использовании кода RZ эти проблемы возникают только при длинных последовательностях нулей. Для решения указанных проблем применяют либо специальные коды, либо технику скремблирования.

Специальные коды – предмет оригинальных разработок. Они имеют различную ширину полосы частот и достаточно сложные схемы кодирования/декодирования.

Скремблирование – процесс относительно простого преобразования, как правило, не изменяющего ширину полосы частот. В основе – техника шифрования данных с взаимно однозначным соответствием исходной и скремблированной последовательностей. Здесь используются простые и однотипные побитовые операции между исходной и эталонной последовательностями.

### **3.3 Методы модуляции оптической несущей**

#### **3.3.1 Виды модуляции (форматы линейной кодовой последовательности)**

Как известно, электромагнитные колебания характеризуются амплитудой, фазой и частотой. В зависимости от того, какой из этих параметров несущей изменяют, различают амплитудную, фазовую и частотную модуляцию. При модуляции несущей цифровым потоком говорят об амплитудной (ASK – amplitude-shift keying), фазовой (PSK – phase- shift keying) и частотной (FSK – frequency- shift keying) манипуляции.

Наиболее просто реализуется ASK. Поскольку в оптических системах передачи манипулируют интенсивностью оптического несущего колебания, то вместо термина «амплитудная модуляция» используют термин «модуляция интенсивности». Если в качестве линейного кода ВОЛП используется однополярный вариант кода NRZ или RZ, то модуляция интенсивности (ASK) сводится к посылке короткого оптического импульса (включению источника оптического излучения) при передаче «1» и выключению при передаче нуля. В случае кода RZ длительность импульса меньше половины длительности двоичного интервала, а момент посылки соответствует середине этого интервала (срезу импульса RZ). Такой метод называется модуляци-

ей/манипуляцией по типу «включено-выключено» (OOK – On-Off Keying). Как правило, модуляция интенсивности применяется совместно с методом прямого детектирования (IM/DD – intensity modulation with direct detection). Это наиболее распространенный на сегодняшний день способ модуляции/демодуляции для ВОЛП.

При фазовой модуляции линейным кодом (PSK) манипулируют фазой оптической несущей, не изменяя ее амплитуду и частоту, так, что модулированное оптическое излучение фактически является непрерывным. Для двоичной PSK фаза принимает значения  $0^0$  и  $180^0$ . Для многоуровневой PSK изменяется дискретно. Например, при восьми уровнях через  $45^0$ . Фазовая модуляция требует применения когерентного приема.

При частотной модуляции линейным кодом (FSK) манипулируют частотой  $f$  оптической несущей. Частота изменяется на величину  $\Delta f$ , принимая значения  $(f+\Delta f)$  при передаче «1» и  $(f-\Delta f)$  при передаче «0». Как видим, работает по принципу модуляции/манипуляции типа «включено-выключено». Типичное значение сдвига частот около 1 Гц. Общая полоса частот FSK-модулированного оптического сигнала составляет примерно  $2(\Delta f+B)$ , где  $B$  скорость передачи линейной кодовой последовательности, а  $\Delta f$  – сдвиг частоты.

Различают широкополосную и узкополосную FSK. В случае, когда девиация (сдвиг) частоты велика, так что  $\Delta f \gg B$  и полоса частот модулированного оптического сигнала составляет около  $2\Delta f$ , частотную манипуляцию называют широкополосной. В случае, когда девиация мала, так что  $\Delta f \ll B$  и полоса частот модулированного оптического сигнала составляет около  $2B$ , частотную манипуляцию называют узкополосной. В обоих случаях глубину модуляции характеризуют коэффициентом  $\beta_{FM} = \Delta f/B$ . Очевидно, что коэффициент модуляции принимает значения  $\beta_{FM} \gg 1$  или  $\beta_{FM} \ll 1$ .

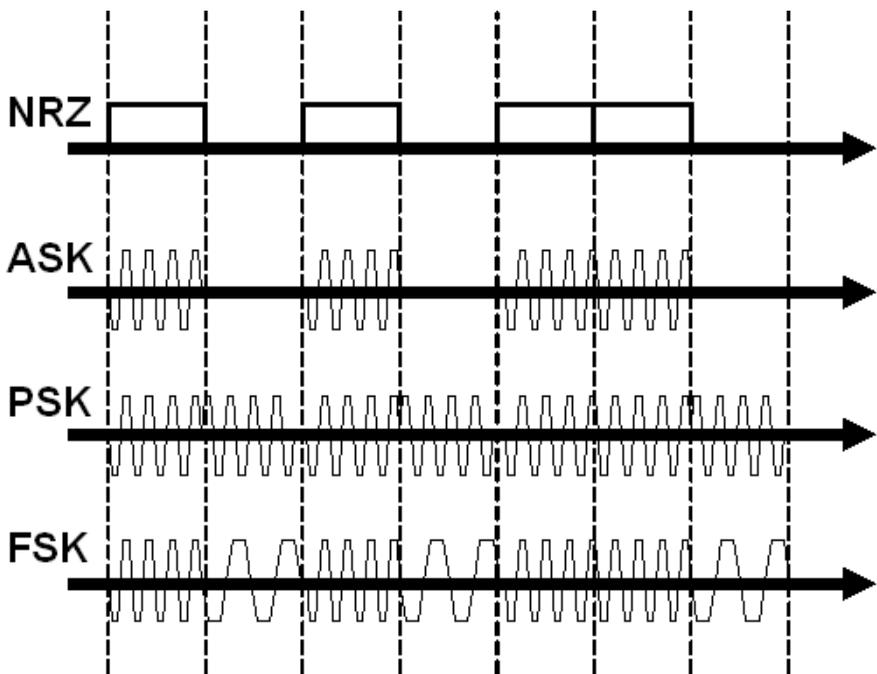


Рис.3 Примеры реализации видов модуляции.

FSK имеет существенные преимущества по сравнению с ASK и PSK, в частности по отношению сигнал/помеха (SNR – signal noise ratio). Однако этот метод требует когерентного приема, что существенно осложняет его практическую реализацию на оптических линиях передачи.

Принципы реализации ASK, PSK и FSK на примере кода NRZ иллюстрирует рис.3.

### 3.3.2 Методы модуляции оптической несущей

Прежде всего, различают прямую модуляцию оптического излучения лазера током накачки и с помощью внешнего модулятора. Также различают непосредственную модуляцию оптической несущей и модуляцию с использованием промежуточной поднесущей. Кроме того, применяются комбинации перечисленных способов. Например, модуляция с использованием поднесущей и внешнего генератора.

Наиболее широко применяется метод прямой модуляции излучения лазера. Линейной кодовой последовательностью (ЛКП) модулируют ток накачки лазера, обеспечивая тем самым манипуляцию интенсивности его оптического излучения в соответствии с ЛКП по принципу включено-выключено (ООК). Достоинство метода простота и дешевизна реализации. Однако он имеет ряд существенных недостатков.

Нелинейная зависимость мощности оптического излучения лазерного диода от тока накачки (нелинейность ватт-амперной характеристики) ограничивает область применения метода или требует применения специальных методов ее линеаризации.

Невозможно в полной мере реализовать преимущества PSK и FSK.

Метод не эффективен в системах спектрального уплотнения, где несколько источников модулирующих сигналов мультиплексируются для передачи по одной оптической несущей.

Имеет место динамическое влияние на спектр оптического излучения и амплитуды отдельных мод резонатора. Нелинейная зависимость показателя преломления материала заполнения резонатора лазера тока накачки приводит к линейной модуляции фазы оптических импульсов – чирпированию импульсов. Чирп-эффект при соответствующих условиях вызывает дополнительное уширение оптических импульсов.

Указанных недостатков можно избежать при использовании стабилизированных источников оптического излучения и внешнего модулятора. Это улучшает функциональные характе-

ристики систем передачи и гибкость системы в целом. Например, это позволяет при необходимости менять формат используемой ЛКП.

Вместо использования непосредственной модуляции оптической несущей, для которой трудно найти электронные компоненты, учитывая высокую частоту оптической несущей (порядка 100 ТГц), можно осуществить процесс модуляции на более низких частотах, используя промежуточную несущую или поднесущую на частоте в диапазоне 10 МГц - 10 ГГц. Этой модулированной поднесущей затем модулируют основную оптическую несущую. Главное преимущество этой схемы модуляции в возможности использования различных стандартных методов и устройств, разработанных для конкретного диапазона частот. Поднесущие также используются при реализации систем спектрального уплотнения. Отдельными входными потоками модулируют свои поднесущие, которые с помощью мультиплексора объединяют в общий сигнал, модулирующий оптическую несущую.

### **3.4 Методы приема**

Выбор методов приема – детектирования (демодуляции) оптического сигнала зависит от того, какой из видов модуляции используется - модуляция интенсивности, фазовая или частотная модуляция (ASK, PSK или FSK). Как уже отмечалось выше, при модуляции интенсивности оптического излучения на приеме используется метод прямого детектирования, а при фазовой и частотной модуляции требуется когерентный прием.

Метод прямого детектирования основан на том, что ток на выходе фотодетектора пропорционален поступающей на его вход мощности оптического излучения. Соответственно приемник ВОСП, реализующий данный метод в общем случае включает фотодетектор, усилитель и фильтр нижних частот. В идеальной системе связи присутствует только дробовой шум опти-

ческого сигнала, который и определяет квантовый предел детектирования.

Фотодетекторы чувствительны к потоку фотонов и не воспринимают фазу воздействующего когерентного оптического излучения. Для определения фазы принимаемого оптического излучения его смешивают с когерентным и стабильным оптическим излучением эталонного источника. В результате смешения когерентных оптических сигналов возникают биения, которые регистрируются фотодетектором и содержат информацию как об интенсивности, так и о фазе принимаемого когерентного оптического сигнала. Этот метод приема и называют когерентным оптическим приемом или просто методом когерентного приема. В общем случае когерентный оптический приемник представляет собой оптический эквивалент супергетеродинного радиоприемника. Различают гетеродинный прием, когда длины волн оптического излучения гетеродина и принимаемого сигнала не одинаковы, и гомодинный прием, когда они равны.

По сравнению с методом прямого детектирования когерентный прием имеет следующие преимущества.

- Возможность определения фазы и частоты когерентного оптического сигнала.
- Прием при спектральном мультиплексировании с меньшими канальными интервалами (100 МГц и менее вместо 100 ГГц и более).
- Возможность электронной компенсации дисперсии волокна.
- Нечувствительность к нежелательному внешнему фоновому оптическому излучению.
- Увеличение отношения сигнал/помеха не менее чем на 3 дБм.

Цена этих преимуществ – сложность системы связи. Необходимым условием когерентного приема является синхронизация принимаемого оптического излучения и оптического излучения гетеродина. То есть, поляризация этих оптических сигналов должна быть одинакова, а фазы согласованы. Это предъяв-

ляет высокие требования к лазерам и оптическим волокнам. Лазеры должны быть «одночастотными» (узкополосными), иметь минимальные флуктуации фазы и интенсивности излучения, то есть отличаться высокой стабильностью. Кроме того, лазер - гетеродин должен синхронизироваться по фазе с принимаемым оптическим сигналом путем адаптивной подстройки фазы и частоты с использованием обратной связи по фазе. При этом, либо необходимо использовать одномодовое волокно с сохранением поляризации, либо в приемник необходимо включить адаптивную систему компенсации поляризации.

Принцип когерентного гомодинного приема оптического сигнала формата PSK без учета шумов поясняет упрощенная структурная схема, приведенная на рис.4. Здесь ЛД – лазерный диод (гетеродин); ОР – оптический разветвитель; ОФ – оптический фильтр. Поступающий на приемник на выходе оптической линии передачи оптический сигнал с частотой  $\omega_c$  смешивается через оптический разветвитель с генерируемым гетеродином когерентным стабильным оптическим излучением с частотой  $\omega_r$ . В случае гомодинного приема  $\omega_c = \omega_r$ . Смешанный сигнал поступает на фотодетектор, выделяющий огибающую биений.

Принцип когерентного приема оптического сигнала формата FSK без учета шумов поясняет упрощенная структурная схема, приведенная на рис.5. Поступающий на прием оптический сигнал с частотой  $\omega_c$  разделяется в оптическом разветвителе на две части одинаковой интенсивности. Одна из них смешивается с оптическим излучением гетеродина с частотой  $\omega_1 = \omega_c - \Delta\omega$ , а другая – с частотой  $\omega_2 = \omega_c + \Delta\omega$ . Оптические фильтры настроены на частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Соответственно в одном плече фотодетектор принимает «1», а в другом - «0». Объединяя сигналы двух плеч, восстанавливают ЛКП.

Другой, более простой вариант когерентного приема оптического сигнала формата FSK без учета шумов представлен на рис.6. Здесь перестраиваемый оптический фильтр работает как преобразователь FSK в ASK.

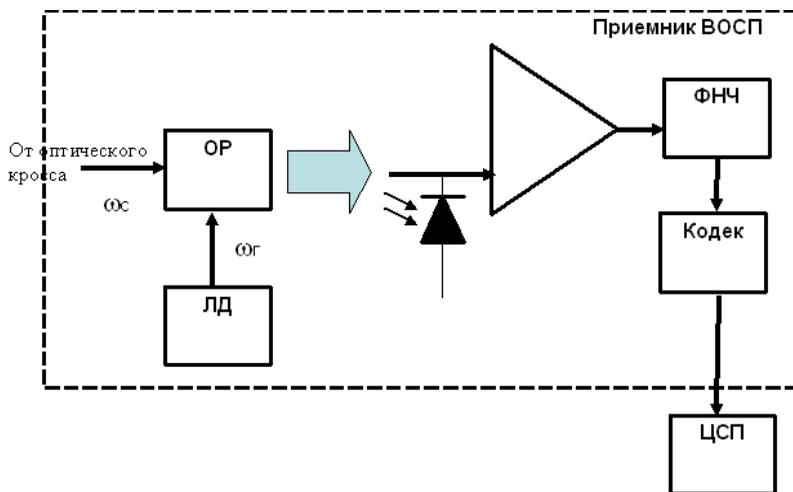


Рис. 4. Принцип когерентного гомодинного приема.

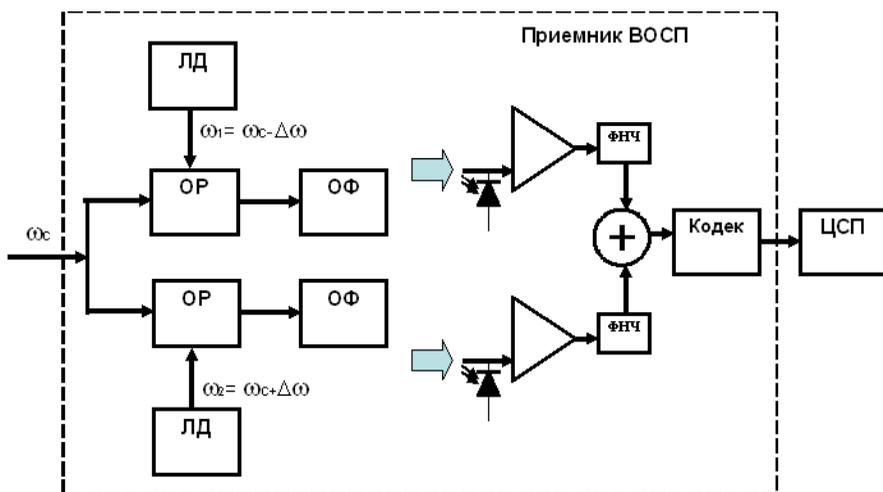


Рис. 5. Принцип когерентного приема формата FSK.

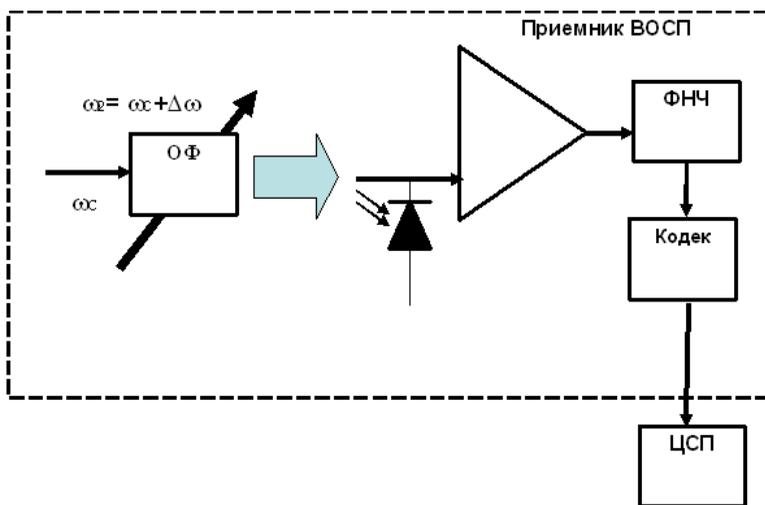


Рис.6. Принцип когерентного приема формата FSK без учета шумов.

### 3.5 Факторы шумов и искажений волоконно-оптической линии передачи

В целом, в соответствии со структурной схемой ВОСП, шумы и искажения сигналов волоконно-оптической линии передачи разделяют на шумы источника излучения, шумы фотоприемного устройства и линейные шумы и искажения. К основным шумам источника излучения относятся собственные шумы лазера, фазовый шум и шумы обусловленные оптической обратной связью, чирп-эффект. Основные шумы фотоприемного устройства – это тепловые и дробовые шумы фотодиода и шумы предусилителя. Линейные шумы - это, в первую очередь, шумы межсимвольной интерференции (ISI), которые включают в себя перекрестные помехи и шумы синхронизации.

Основные факторы искажений оптических импульсов при распространении в оптических волокнах – потери, дисперсия и нелинейные эффекты.

Поскольку предполагается, что передача осуществляется на одной оптической несущей и в пределах РУ линейные оптические усилители и компенсаторы дисперсии не устанавливаются, то шумы оптических усилителей, а также шумы и искажения сигналов характерные для систем спектрального уплотнения (Wave Divided Multiplexing –WDM), здесь не рассматриваются.

**Оптические потери в одномодовых волокнах.** Типичная характеристика затухания кварцевого оптического волокна и ее эволюция с развитием технологии производства волокон представлена на рис. 7.

К фундаментальным факторам потерь относятся механизмы поглощения и рассеяния. Основной вклад вносят потери за счет релеевского рассеяния и инфракрасного поглощения. До недавнего времени существенный вклад вносили потери, обусловленные поглощением на примесях – в основном на примесях гидроксильной группы **ОН**. Эти потери носят резонансный характер. Дополнительные факторы потерь в оптических волокнах – это потери, вызванные микро- и макроизгибами волокна, потери, обусловленные флюктуациями диаметра сердцевины волокна (границы сердцевина-оболочка). Эти потери нередко называют кабельными.

Как показывает рис.7 в области малых длин волн затухание кварцевого оптического волокна уменьшается с увеличением длины волны в основном по закону Релеевского рассеяния. Релеевское рассеяние обусловлено флюктуациями показателя преломления материала сердцевины вдоль и поперек оси волокна, что приводит к рассеянию света на случайных изменениях показателя преломления. Часть рассеянного светового потока образует поток обратного релеевского рассеяния, распространяющийся к источнику излучения, часть - попутный поток, направление распространения которого совпадает с направлением распространения полезного сигнала, а часть уходит в оболочку. Потери за счет релеевского рассеяния изменяются по закону

$$\alpha_{PP} = \frac{C_{PP}}{\lambda^4}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны, мкм;

$C_{PP}$  – постоянная, которая зависит от состава материала сердцевины волокна и лежит в пределах  $C_{PP}=0,7...0,9$  мкм<sup>4</sup>·дБ/км.

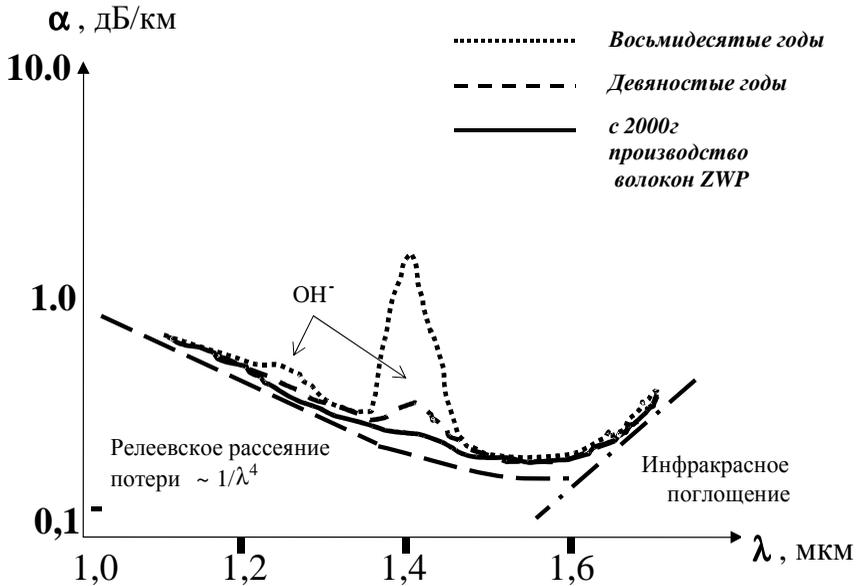


Рис. 7. Зависимость затухания сигнала в ОВ.

В области длин волн более 1,7 – 1,8 мкм начинают проявляться потери из-за инфракрасного поглощения в кварце, вызванного резонансами атомов в кристаллической решетке  $\text{SiO}_2$ . Изменение затухания инфракрасного поглощения описывается формулой

$$\alpha_{ИКП} = C_{ИКП} \cdot \exp\left(-\frac{k_{ИКП}}{\lambda}\right), \quad (6)$$

где  $C_{ИКП}$  и  $k_{ИКП}$  – постоянные коэффициенты, которые для чистого кварца составляют порядка  $C_{ИКП}=0,9$  дБ/км,  $k_{ИКП}=0,8$  мкм.

Поглощения на примесях связаны с резонансами материала примеси. В частности, поглощением на примеси гидроксильной группы  $OH^-$  определяются пики потерь в областях длин волн 1383; 1240; 1130; 950; 875; 825 и 725 нм [7]. Этот тип потерь зависит от технологии изготовления волокна. С разработкой более совершенных методов очистки материала кварцевого стекла от примесей и способов защиты от формирования примесей гидроксильной группы в стекле в дальнейшем были получены оптические волокна с пониженным водяным пиком (LPW – low water peak) или, как их еще называют, волокна с нулевым водяным пиком (ZWP –zero water peak). К волокнам этой группы относятся волокна AllWave (OFS) и SMF-28e (Corning). Потери для таких волокон на «водяном» пике уменьшены до 0,31 дБ/км, что меньше чем на длине волны 1310 нм (0,35 дБ/км).

Фундаментальные механизмы потерь определяют область минимального затухания и теоретический предел минимума потерь кварцевого волокна, который составляет около 0,15 дБ/км на длине волны 1550 нм. Однако этот достигнуть этот предел не позволяют кабельные потери из-за микро- и макроизгибов волокна, флуктуаций его геометрических характеристик.

Диапазон работы ВОСП выбирается в области минимального затухания кварцевых оптических волокон и лежит в пределах 1260 -1675 нм. Выделяют шесть спектральных диапазонов, данные которых сведены в таблице 2 [6, 11].

Таблица 2.

Условное обозначение	Наименование	Диапазон, нм
O	Основной (original)	1260–1360
E	Расширенный (expanded)	1360–1460
S	Коротковолновый (short)	1460–1530
C	Стандартный (conventional)	1530–1565
L	Длинноволновый (long)	1565–1625
U	Сверх-длинноволновый (ultra-long)	1625–1675

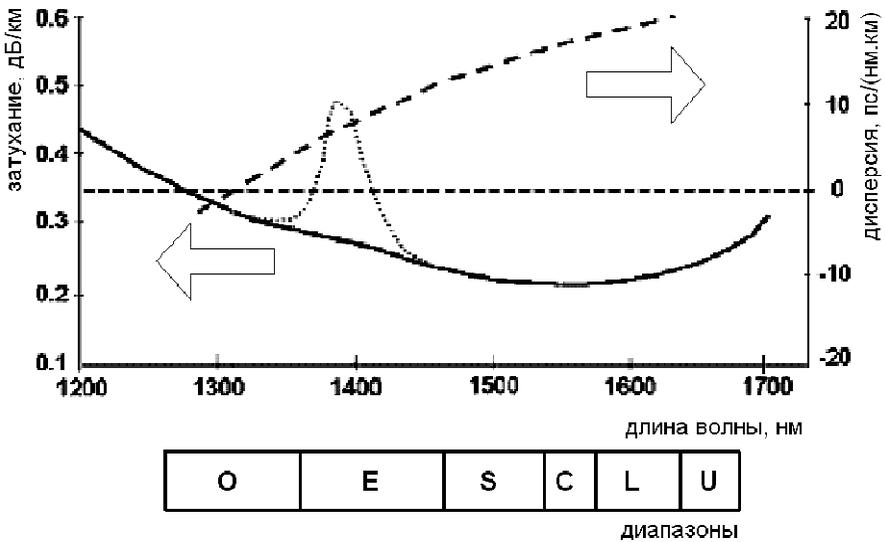


Рис. 8. Спектральные характеристики затухания и дисперсии ОВ.

Сегодня на местных сетях в основном работают в диапазоне O, а на магистральных в диапазонах C и L, где можно использовать оптические усилители на легированных эрбием волокнах EDFA (erbium doped fiber amplifier). Однако в последние годы с внедрением систем «грубого» спектрального уплотнения (CWDM) начинают осваиваться все диапазоны. На рис. 8 пред-

ставлены спектральные характеристики затухания и дисперсии стандартного одномодового ступенчатого оптического волокна и расположение основных спектральных диапазонов.

**Дисперсионные характеристики одномодовых оптических волокон.** Дисперсией оптических волокон называют увеличение длительности оптических импульсов при их распространении по оптическому волокну. Дисперсия обусловлена тем, что отдельные составляющие оптического импульса распространяются с разной скоростью. Дисперсия ОВ создает переходные помехи, ведет к межсимвольным искажениям и, как следствие, ограничивает скорость передачи в линии (длину регенерационного участка), что поясняет рис. 9.

Одномодовые оптические волокна характеризуются хроматической и поляризационной модовой дисперсией. **Хроматическая дисперсия** обусловлена конечной шириной линии излучения лазера и различием скоростей распространения отдельных спектральных составляющих оптического сигнала. Под хроматической дисперсией понимают изменение формы огибающей оптического сигнала, обусловленное зависимостью постоянной распространения моды от длины волны. Хроматическая дисперсия есть величина детерминированная. Она равна сумме материальной и волноводной дисперсии. **Материальная дисперсия** обусловлена зависимостью показателя преломления материала сердцевины и оболочки от длины волны, которая, в свою очередь, вызывает изменения с длиной волны скорости распространения. Из известных из физики соотношений следует  $v_g(\lambda) = c/n(\lambda)$ . **Волноводная дисперсия** обусловлена спектральной зависимостью скорости передачи, характер которой определяется профилем показателя преломления оптического волокна. Изменяя профиль показателя преломления, можно соответственно изменить спектральную характеристику хроматической дисперсии.

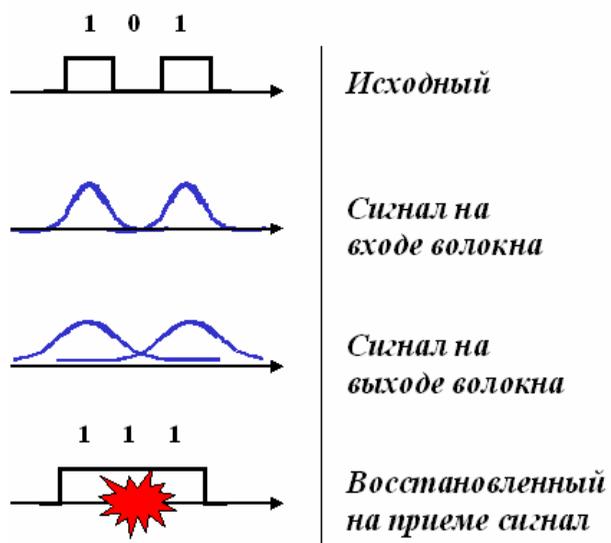


Рис. 9. Появление межсимвольных искажений из-за дисперсии в ОВ.

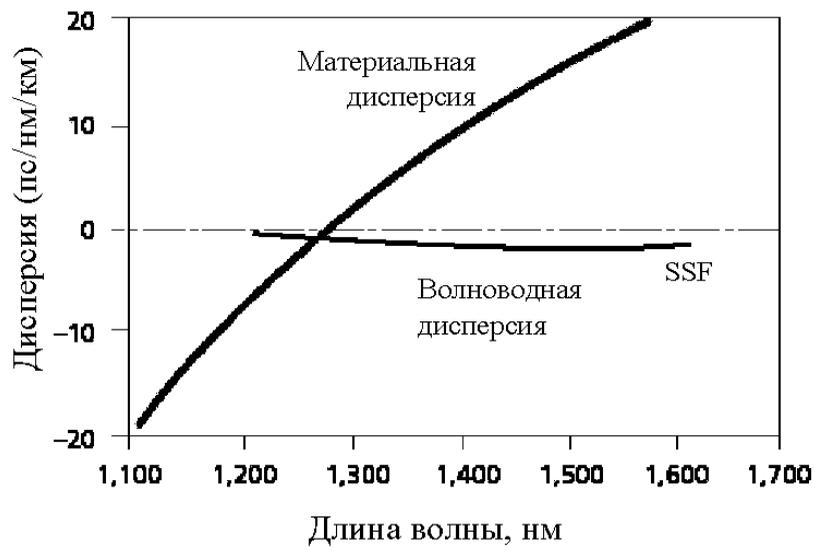


Рис. 10. Изменение дисперсионных характеристик ОВ.

Спектральная характеристика дисперсии и спектральная характеристика потерь для стандартного одномодового ступенчатого оптического волокна (SSF – standard step index fiber), оптимизированного для работы в диапазоне О (рекомендации G.652 МСЭ-Т), приведена на рис.8. На рис. 10 представлены типичные спектральные характеристики волноводной и материальной дисперсии волокна SSF.

Изменение хроматической дисперсии в области точки нулевой хроматической дисперсии и физический смысл ее отрицательных и положительных значений поясняет рис. 11.

В качестве характеристик хроматической дисперсии оптических волокон используют коэффициент хроматической дисперсии  $D$ , имеющий размерность пс/(нм.км), коэффициент наклона дисперсионной характеристики  $S_0$ , имеющий размерность пс/(нм<sup>2</sup>.км) и относительный коэффициент наклона дисперсионной характеристики  $RDS = S_0 / D$  с размерностью 1/нм. Последняя величина однозначно связана с полосой пропускания оптического волокна и характеризует поведение дисперсионной характеристики в диапазоне длин волн.

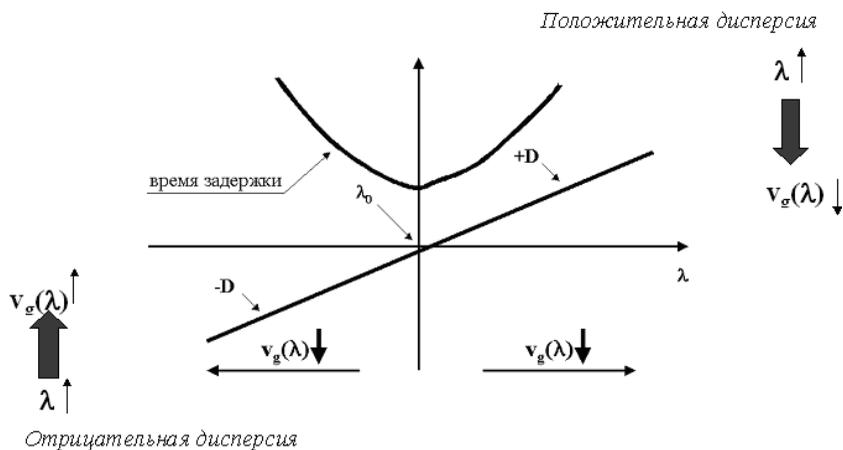


Рис. 11. Физический смысл отрицательных и положительных значений дисперсии.

**Поляризационная модовая дисперсия (PMD - polarization mode dispersion)** – величина случайная. Ее компенсировать значительно сложнее, чем хроматическую.

Причина поляризационной модовой дисперсии - явление двулучепреломления, которое имеет место при нарушении круговой симметрии геометрических характеристик или внутренних механических напряжений ОВ. Как следствие, в волокне образуются «быстрая» и «медленная» оси, вдоль которых моды ортогональной поляризации распространяются с разной скоростью и, соответственно, приходят к концу некоторого отрезка оптического волокна в разное время (рис. 12). Другими словами, моды разной поляризации приходят с определенной задержкой относительно друг друга (DGD - differential group delay).

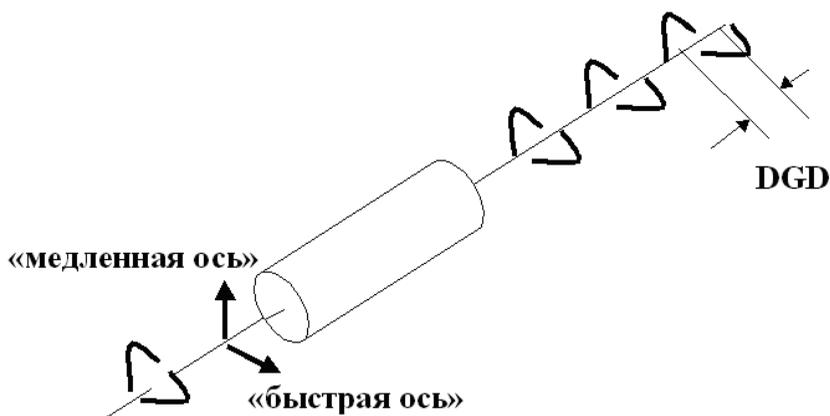


Рис. 12. Образование «быстрой» и «медленной» оси ОВ.

Однако, оптические волокна нерегулярны. Конструктивные характеристики и механические напряжения флюктуируют вдоль волокна. Как следствие, вдоль волокна флюктуирует ориентация в пространстве «быстрой» и «медленной» осей, что обуславливает случайный характер изменения связей мод отдельных отрезков волокна. В результате на протяженной линии передачи импульс «расплывается» (рис. 13). А так как коэффи-

коэффициенты связей мод вдоль линии изменяются случайно, то коэффициент поляризационной модовой дисперсии имеет размерность пс/км<sup>1/2</sup> и равен

$$\langle DGD \rangle / \sqrt{L}. \quad (7)$$

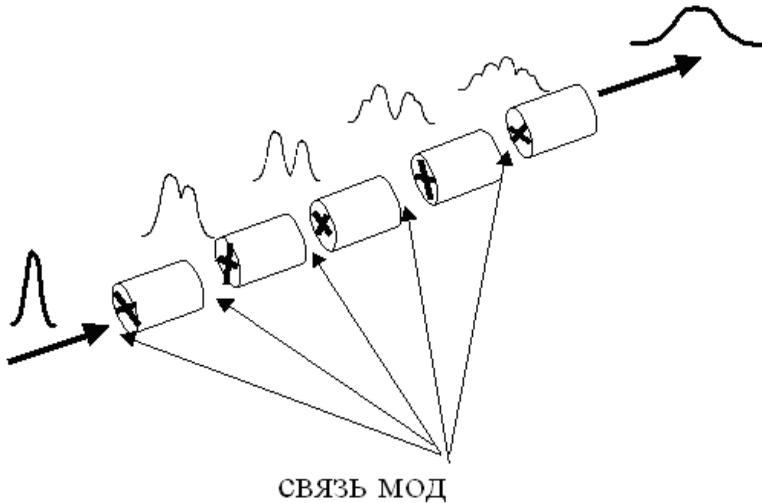


Рис. 13. Искажение передаваемого импульса в ОВ.

**Нелинейные явления.** Нелинейные явления в оптическом волокне имеют место при увеличении интенсивности оптического излучения, равной отношению оптической мощности, передаваемой в волокне, к эффективной площади сечения волокна  $I=P/A_{eff}$ . Различают явления рассеяния или явления преломления. Явления рассеяния связаны с изменениями действительной части постоянной распространения и проявляются как затухание или усиление оптической мощности. Известно вынужденное обратное рассеяние Бриллюэна - Манделъштама на акустических фонах (SBS - Stimulated Brillouin Scattering) и вынужденное комбинационное рассеяние Рамана на оптических фонах. Явления преломления связаны с изменениями мнимой части по-

стоянной распространения. Они проявляются как фазовая авто-модуляция или воздействие сигнала на собственную фазу (SFM-Self Phase Modulation), перекрестная фазовая модуляция или воздействие сигнала одного канала на фазу сигнала в другом канале (CFM- Cross Phase Modulation) и четырехволновое смешение (FWM - Four Wave Mixing).

Поскольку на исследуемом РУ оборудование линейных оптических усилителей не предусмотрено, нелинейные явления в оптическом волокне можно не учитывать.

### **Чирп-эффект.**

Еще одна причина искажений оптических импульсов-чирп-эффект [5, 22–23]. В лазерах с прямой модуляцией излучения при изменении тока накачки (прямая модуляция) меняется не только коэффициент усиления диода, но и показатель преломления. Как следствие, меняется частота излучения лазера. Это и есть чирп. Характерно, что при скоростях модуляции выше 1 ГГц этот чирп имеет положительный знак. В этом случае длительность чирпированных импульсов при передаче в волокне с положительной дисперсией увеличивается, а в волокне с отрицательной дисперсией – нет.

## **4. Расчет параметров передачи оптических волокон**

Тип одномодового ступенчатого оптического волокна необходимо выбирать самостоятельно на основе анализа исходных данных и технических характеристик оптических волокон, представленных в Приложении 1 данного пособия. На основании указанных технических характеристик определяются исходные данные для расчета параметров ступенчатого оптического волокна. Исходные данные занесите в таблицу 3.

**Расчет коэффициента затухания оптического волокна.** Расчет коэффициента затухания выполняется на центральной длине волны оптического канала. Предварительно определите

спектральный диапазон, в котором лежит центральная длина волны. Для расчета спектральной характеристики потерь оптического волокна воспользуемся известными приближенными формулами [20]. Результирующий коэффициент затухания волокна в дБм/км определяется как сумма

$$\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{PP} + \alpha_{ИКП} + \alpha_{OH} . \quad (8)$$

Таблица 3

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Марка ОВ		
Опорная длина волны спектрального диапазона О	$\lambda_{SO}$ , нм	
Максимальное затухание на опорной длине волны спектрального диапазона О	$\alpha_{SO}$ , дБ/км	
Опорная длина волны спектрального диапазона Е (длина волны «водяного» пика)	$\lambda_{SE}$ , нм	
Максимальное затухание на длине волны «водяного» пика (опорной длине волны диапазона Е)	$\alpha_{SE}$ , дБ/км	
Опорная длина волны спектрального диапазона С	$\lambda_{SC}$ , нм	
Максимальное затухание на опорной длине волны спектрального диапазона С	$\alpha_{SC}$ , дБ/км	
Максимальный прирост затухания относительно опорной длины волны в рабочем диапазоне	$\Delta\alpha_{\lambda}$ , дБ/км	
Длина волны нулевой дисперсии	$\lambda_0$ , нм	
Параметр наклона спектральной характеристики дисперсии оптического волокна в точке нулевой дисперсии	$S_0$ , $\frac{nc}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}$	
Максимальное значение поляризационной модовой дисперсии	$PMD$ , $\frac{nc}{\sqrt{\text{км}}}$	

Здесь, составляющая потерь релеевского рассеяния на длине волны  $\lambda$  определяется соотношениями

$$\alpha_{PP} = (1 + \delta\alpha_{PP}) \cdot \bar{\alpha}_{PP} \quad (9)$$

$$\bar{\alpha}_{PP} = 6.3 \cdot 10^{11} / \lambda^4 \quad (10)$$

Составляющая потерь инфракрасного поглощения на длине волны  $\lambda$  определяется по формулам

$$\alpha_{ИКП} = (1 + \delta\alpha_{ИКП}) \cdot \bar{\alpha}_{ИКП} \quad (11)$$

$$\bar{\alpha}_{ИКП} = 7,81 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-4.85 \cdot 10^4 / \lambda) \quad (12)$$

Составляющая потерь, обусловленная примесями  $\text{OH}^-$ , рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{OH} = \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, & \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH, \max} \\ \alpha_{OH, \max}, & \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH, \max} \end{cases}, \quad (13)$$

где

$$\alpha_{OH, \max} = \alpha_{SE} - \alpha_{PP}(\lambda_{SE}) - \alpha_{ИКП}(\lambda_{SE}) \quad (14)$$

$$\bar{\alpha}_{OH} = \frac{7 \cdot \Delta\alpha_{OH}}{49 + (\lambda - \lambda_{SE})^2} \quad (15)$$

В формулах (9)–(15) длина волны подставляется в нм. Размерность искомых коэффициентов затухания – дБм/км. Параметры  $\Delta\alpha_{OH}$ ,  $\delta\alpha_{PP}$ ,  $\delta\alpha_{ИКП}$  уточняются для каждого конкретного типа оптического волокна в зависимости от его технических данных - значений максимальных потерь на опорных длинах

волн в диапазонах О, С и на длине волны «водяного пика» диапазона Е. Расчеты выполняются в следующем порядке.

$$\Delta\alpha_{OH} = \alpha_{SE} - \bar{\alpha}_{PP}(\lambda_{SE}) \quad (16)$$

$$\delta\alpha_{PP} = \frac{\alpha_{SO} - \alpha_{OH}(\lambda_{SO})}{\bar{\alpha}_{PP}} - 1 \quad (17)$$

$$\delta\alpha_{ИКП} = \frac{\alpha_{SC} - \alpha_{OH}(\lambda_{SC}) - \alpha_{PP}(\lambda_{SC})}{\bar{\alpha}_{ИКП}} - 1 \quad (18)$$

Рассчитайте спектральную характеристику максимального значения коэффициента затухания оптического волокна для диапазона, соответствующего центральной длине волны оптического канала, и постройте график зависимости.

Во всем спектральном диапазоне должно выполняться неравенство

$$\alpha_{\max} < \alpha_{SX} + \Delta\alpha_{\lambda}, \quad (19)$$

Где  $\alpha_{SX}$  – коэффициент затухания оптического волокна на опорной длине волны, ближайшей к спектральному диапазону, в котором лежит центральная длина волны оптического канала, равный, соответственно,  $\alpha_{SO}$ ,  $\alpha_{SE}$  или  $\alpha_{SC}$ .

Если условие (17) не выполняется, следует полагать

$$\alpha_{\max} = \alpha_{SX} + \Delta\alpha_{\lambda}$$

Среднее значение коэффициента затухания оптического волокна можно приближенно оценить следующим образом

$$\bar{\alpha} = \alpha_{\max} - 0,016 \quad (20)$$

**Расчет хроматической дисперсии.** Параметр хроматической дисперсии стандартного ступенчатого волокна в пс/(нм·км) рассчитывается по формуле

$$D_{ОВ}(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (21)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны нулевой дисперсии, нм;

$\lambda_c$  – центральная длина волны, нм;

$S_0$  – параметр наклона спектральной характеристики дисперсии оптического волокна в точке нулевой дисперсии, пс/(нм<sup>2</sup>·км).

Рассчитайте спектральную характеристику параметра хроматической дисперсии оптического волокна для диапазона, соответствующего центральной длине волны оптического канала, и постройте график зависимости.

Результаты расчетов параметров на центральной длине волны сведите в таблицу 4.

Таблица 4.

Параметр	Усл. Обозн.	Значение
Максимальное значение затухания ОВ на центральной длине волны	$\alpha_{\text{макс}}$ , дБ/км	
Среднее значение затухания ОВ на центральной длине волны	$\bar{\alpha}$ , дБ/км	
Параметр хроматическая дисперсия ОВ на центральной длине волны	$D_{ОВ}, \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}$	

## 5. Определение энергетического потенциала системы

Для характеристики бюджета мощности ВОСП вводят понятие энергетического потенциала (перекрываемого затухания), который определяется как допустимые оптические потери оптического тракта или ЭКУ между точками нормирования, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. Оптические потери обусловлены потерями на затухание и дополнительными потерями мощности, обусловленными влиянием отражений, дисперсии (хроматической и поляризационной модовой), модовых шумов и чирп-эффекта.

Энергетический потенциал рассчитывается как разность между уровнем мощности оптического излучения на передаче и уровнем чувствительности приемника

$$W = p_{пер} - p_{пр}, \quad (22)$$

где  $W$  – энергетический потенциал (перекрываемое затухание), дБм;

$p_{пер}$  – уровень мощности оптического излучения передатчика ВОСП, дБм;

$p_{пр}$  – уровень чувствительности приемника, дБм.

Уровень мощности оптического излучения – это средняя мощность оптического излучения, выраженная в дБм. При этом, под средней мощностью оптического излучения понимают среднее значение мощности оптического излучения при модуляции оптической несущей цифровым сигналом. Уровнем чувствительности приемника называют минимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала.

Приемник ВОСП характеризуется как уровнем чувствительности, так и уровнем перегрузки – максимальным значением уровня мощности оптического излучения в точке нормирова-

ния оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. Разность между уровнем перегрузки и уровнем чувствительности приемника ВОСП определяет пределы регулировки АРУ системы -  $\Delta A$ . Типичное значение  $\Delta A=20$  дБм.

Результат расчета энергетического потенциала и предполагаемое значение пределов регулировки АРУ внесите в табл 5.

Таблица 5

Параметр	Усл. обозн.	Значение
Энергетический потенциал	W, дБм	
Пределы регулировки АРУ	$\Delta A$ , дБм	

## 6. Оптические кроссы и параметры разъемных соединений

Соединение линейного и станционного ОВ на оптическом кроссе выполняется с помощью оптических разъемов, которые состоят из вилок (коннекторов) и розеток (адаптеров). Штекерные наконечники коннекторов с двух сторон вставляют в розетку разъема, что и обеспечивает соединение волокон. Аналогично производится подключение волокон к активному оборудованию ВОСП, интерфейс которого включает ответную часть розетки оптического разъема. Оптическими коннекторами оконцовываются (армируются) оптические шнуры – оптические волокна со вторичными внешними защитными покрытиями. Шнуры, оконцованные с одной стороны, принято называть пигтейлами. Шнуры, оконцованные с двух сторон, называют патчкордами. Условная схема соединений линейного и станционного волокон на оптическом кроссе представлена на рисунке 14.

На сетях связи применяют в основном оптические разъемы типа FC и SC. Внешний вид оптического разъема FC представлен на рис. 15. Вилочная часть разъема FC имеет керамический наконечник длиной диаметром 2,5 мм. Способ фиксации – резь-

бовой. Внешний вид оптического разъема SC представлен на рис. 16. Вилочная часть разъема SC имеет керамический наконечник диаметром 2,5 мм. Способ крепления – защелка. Преимущество разъемов SC – высокая надежность при реализации оперативного подключения, а также возможность формирования сборок. На сегодняшний день активное оборудование ВОСП комплектуется в основном оптическими разъемами типа SC и, вместе с тем, подавляющее большинство оптических кроссов сетей связи укомплектовано оптическими разъемами типа FC. Однако следует отметить, что в последнее время и здесь начинают отдавать предпочтение разъемам типа SC.

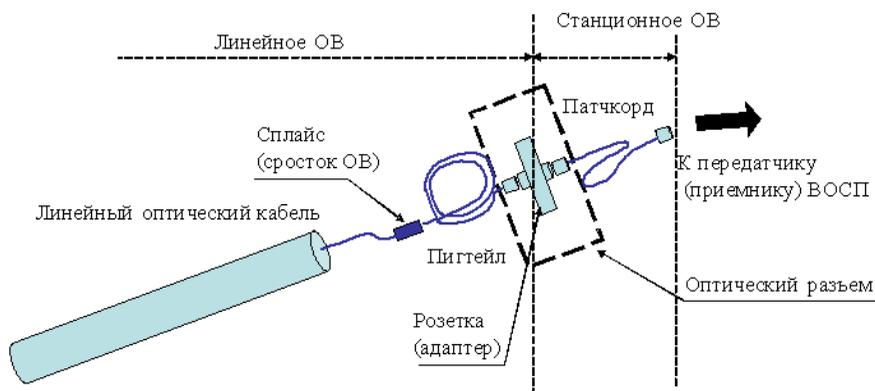


Рис.14. Схема соединения станционного и линейного ОВ на оптическом кроссе.



Рис. 15. Розеточная и вилочная части разъема FC.

Поскольку соединители должны вносить минимальные искажения в оптический тракт, то, в первую очередь, стараются минимизировать вносимые ими потери и неоднородности. Соответственно, к параметрам передачи оптических разъемов относят вносимые потери (затухание) и затухание отражения. Потери на разъемном соединении  $A_{I,PC}$  определяются как разность уровней средней мощности оптического излучения на входе и выходе оптического разъема. Затухание отражения – это разность уровней мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на передаче и мощности оптического излучения, возвращающегося к этой точке, выраженная в дБм. Различают оптические разъемы типа FC/PC, SC/PC и FC/APC, SC/APC. Обозначение PC (physical contact) означает физический контакт торцов соединяемых волокон. Обозначение APC (angle physical contact) также подразумевает физический контакт торцов соединяемых волокон, но при этом скол (шлифовка) торцов оптических волокон выполнена под углом 88 – 89 градусов. Такой угол обеспечивает при незначительном увеличении потерь в соединении значительное уменьшение неоднородности (увеличение затухания отражения).

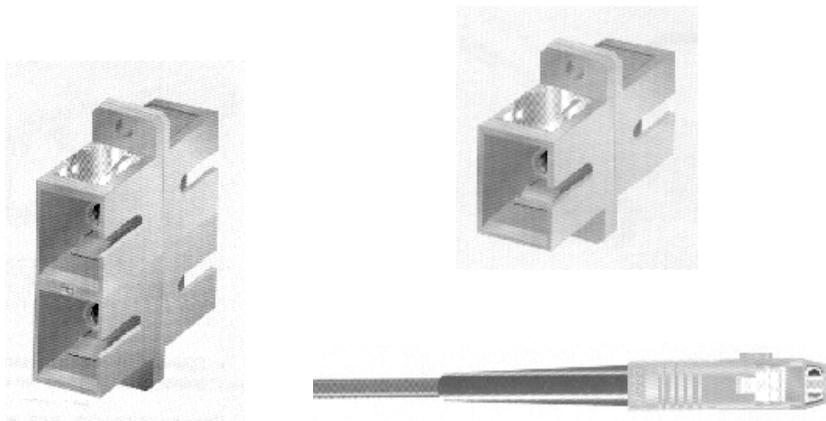


Рис. 16. Розеточная и вилочная части разъема SC.

Таблица 6

Параметр	Усл. обозн.	Тип	Значение
Максимальное значение потерь в разъемном соединении	$A_{I,PC}$ , дБ	FC/PC, SC/PC	0,4
		FC/APC, SC/APC	0,5
Минимальное значение коэффициента отражений	$A_{OTP}$ , дБ	FC/PC, SC/PC	40
		FC/APC, SC/APC	58
Максимальное число соединений		FC SC	1000

К эксплуатационным характеристикам оптических разъемов относятся диапазоны температуры, давления, влажности, в которых обеспечивается нормальная работа разъемных оптических соединений, а также допустимое число соединений. Типичные характеристики оптических разъемов приведены в таблице 6.

## 7. Нормы приемо-сдаточных измерений ЭКУ

Потери на ЭКУ ВОЛП нормируются таким образом, чтобы разность между энергетическим потенциалом ВОСП и суммарными потерями оптической мощности на ЭКУ совместно со стационарными кабелями, которые включают и дополнительные потери, обусловленные влиянием отражений, дисперсии (хроматической и поляризационной модовой), модовых шумов и чирп-эффекта, была не менее допустимого эксплуатационного запаса. Эксплуатационный запас на ЭКУ определяется как сумма эксплуатационного запаса на аппаратуру и эксплуатационного запаса на кабель. Нормы на эксплуатационный запас приведены в таблице.

Таблица 7

Параметр	Усл. обозн.	Значение
Эксплуатационный запас аппаратуры	$A_{ЭЗА}$ , дБ	3
Эксплуатационный запас кабеля	$A_{ЭК}$ , дБ	3
Максимальная погрешность измерения затухания на ЭКУ	$\delta a$ , %	5

Абсолютное значение максимальной погрешности измерения затухания на ЭКУ выраженное в дБ, равно:

$$\Delta a = \delta a \cdot A_{ЭКУ} / 100 \quad (23)$$

Здесь  $A_{ЭКУ}$  - суммарные измеряемые потери оптического линейного тракта на ЭКУ. Поскольку для нормальной работы ВОЛП необходимо, чтобы выполнялось условие  $A_{ЭКУ} < W$ , в качестве оценки максимальной погрешности можно принять значение

$$\Delta a = \delta a \cdot W / 100 \quad (24)$$

Рассчитайте его.

Распределение потерь в неразъемных соединениях ЭКУ, определяемое для каждого оптического волокна по отдельности, должно соответствовать требованиям представленным в таблице 8.

Таблица 8

Длина волны	Максимально допустимые потери в неразъемных соединениях для	
	100% соединений $A_{НС, макс}$ , дБ	50% соединений $\bar{A}_{НС}$ , дБ
1300 нм	0,2	0,1
1550 нм	0,1	0,05

## 8. Расчет длины элементарного кабельного участка ВОЛП

Элементарный кабельный участок (ЭКУ) – это вся физическая среда передачи между соседними окончаниями участка. Здесь под физической средой подразумевается совокупность оптического волокна линейного кабеля и его сростков в точках соединения строительных длин, оптического волокна стационарных кабелей и их сростков с линейными оптическими волокнами, а также кроссовых оптических шнуров.

В соответствии с требованиями нормативно-технической документации [1] определяют значения номинальной, минимальной и максимальной длины элементарного кабельного участка (ЭКУ). Эти длины ЭКУ определяются бюджетом мощности ВОСП, потерями и дисперсией оптического линейного тракта. Они рассчитываются по следующим формулам [1]

$$L_{НОМ} = \frac{W - A_{ЭЗА} - A_{РС} - A_{Д} + A_{НСмакс} - A_{ЭЗК} - \Delta a}{\alpha_{макс} + A_{НСмакс} / \bar{l}} \quad (25)$$

$$L_{МИН} = \frac{W - \Delta a - A_{РС} + \bar{A}_{НС}}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{НС} / \bar{l}} \quad (26)$$

$$L_{МАКС} = \frac{W - A_{ЭЗА} - A_{РС} - A_{Д} - \bar{B} \cdot \sqrt{L_{НОМ}} + \bar{A}_{НС} - A_{ЭЗК} - \Delta a}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{НС} / \bar{l}} \quad (27)$$

где

- $W$  – энергетический потенциал системы передачи, дБ;
- $A_{ЭЗА}$  – эксплуатационный запас аппаратуры дБ;
- $A_{ЭЗК}$  – эксплуатационный запас кабеля, дБ;
- $A_{РС}$  – потери в разъёмных соединениях, дБ;

- $A_{НС\max}$  – максимальное значение потерь неразъемного соединения, дБ;
- $\bar{A}_{НС}$  – среднее значение потерь неразъемного соединения, дБ;
- $A_{д}$  – эксплуатационный запас энергетического потенциала на дисперсию, учитываемый на регенерационных участках предельной длины с оптическими усилителями, дБ;
- $\Delta A$  – пределы регулировки АРУ, дБ;
- $\alpha_{\max}$  – максимальное значение коэффициента затухания ОВ, дБ/км;
- $\bar{\alpha}$  – среднее значение коэффициента затухания ОВ, дБ/км;
- $\bar{l}$  – средняя строительная длина ОК, км;
- $\bar{B}$  – параметр;
- $\Delta a$  – погрешность измерения затухания, дБ.

Параметр  $\bar{B}$  определяется по формуле

$$\bar{B} = \frac{3 \cdot 0.8}{2 \cdot \lambda^4 \cdot \sqrt{12}} \cdot \sqrt{1 + 1/\bar{l}}, \quad (28)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны, мкм.

Строительная длина оптического кабеля, как правило, лежит в пределах от 1,0 км до 6,0 км. Ее среднее значение составляет 4,0 км.

Поскольку согласно условиям на регенерационном участке нет линейных оптических усилителей и компенсаторов дисперсии, то длины ЭКУ ограничены и в первом приближении при расчетах будем полагать  $A_{д}=0$  дБ.

Результаты расчетов максимальной, минимальной и номинальной длин ЭКУ занесите в таблицу 9.

Таблица 9.

Рассчитываемая величина	Усл. обозн.	Значение
Параметр ЭКУ	$\bar{B}$	
Номинальная длина ЭКУ	$L_{НОМ}$ , км	
Минимальная длина ЭКУ	$L_{МИН}$ , км	
Максимальная длина ЭКУ	$L_{МАКС}$ , км	

## 9. Расчет дисперсионных характеристик ОВ на ЭКУ

Длина регенерационного участка ВОЛП ограничивается не только затуханием, но и дисперсией линии передачи. Допустимые значения хроматической и поляризационной модовой дисперсии на регенерационном участке ВОЛП зависят от скорости передачи линейной кодовой последовательности. В случае применения кода NRZ и модуляции без чирпа в соответствии с рекомендациями МСЭ и Т [3] максимально допустимые для РУ значения хроматической дисперсии  $D_{PY}$  в пс/нм и поляризационной модовой дисперсии  $PMD_{PY}$  в пс при ухудшении отношения сигнал/помеха не более, чем на 1,0 дБ, определяются по формулам

$$D_{PY} = 104000 / B^2 \quad (29)$$

$$PMD_{PY} = 140 / B \quad (30)$$

где  $B$  – скорость передачи в линии, Гбит/с.

Приведенное к одному километру длины линии передачи значение хроматической дисперсии оптического волокна определяется формулой

$$D_{ch} = D_{OB} \cdot \Delta\lambda, \quad (31)$$

где  $D_{ОВ}$  – значение параметра дисперсии оптического волокна, определяемое по его техническим данным, пс/(нм · км);  
 $\Delta\lambda$  - ширина линии излучения лазера, нм.

Таблица 10

<b>Параметр</b>	<b>Усл. обозн.</b>	<b>Значение</b>
Хроматическая дисперсия оптического волокна	$D_{ОВ}, \frac{пс}{нм \cdot км}$	
Приведенное значение хроматическая дисперсия оптической линии передачи	$D_{ch}, \frac{пс}{км}$	
Прогнозируемое номинальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{НОМ}, пс$	
Прогнозируемое минимальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{МИН}, пс$	
Прогнозируемое минимальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{МИН} \cdot пс$	
Максимальное допустимое значение хроматической дисперсии ВОЛП на ЭКУ	$D_{ЭКУ} \cdot пс$	
Прогнозируемое номинальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{НОМ}, пс$	
Прогнозируемое минимальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{МИН}, пс$	
Прогнозируемое максимальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{МАКС}, пс$	
Максимальное допустимое значение ПМД ЭКУ	$PMD_{ЭКУ}, пс$	

Прогнозируемые значения хроматической дисперсии на ЭКУ определяются, соответственно, следующим образом:

$$D_{НОМ} = D_{ch} \cdot L_{НОМ} \quad (32)$$

$$D_{МИН} = D_{ch} \cdot L_{МИН} \quad (33)$$

$$D_{МАКС} = D_{ch} \cdot L_{МАКС} \quad (34)$$

А прогнозируемые значения поляризационной модовой дисперсии рассчитываются по формулам

$$PMD_{НОМ} = PMD \cdot \sqrt{L_{НОМ}} \quad (35)$$

$$PMD_{МИН} = PMD \cdot \sqrt{L_{МИН}} \quad (36)$$

$$PMD_{МАКС} = PMD \cdot \sqrt{L_{МАКС}} \quad (37)$$

Результаты расчета параметров дисперсии по описанной выше методике сведены в таблицу 10.

В формулах (25-27) накладываемые дисперсией ограничения на длину регенерационного участка учитываются с помощью параметра  $A_D$ . Значение эксплуатационный запаса на дисперсию равно дополнительным потерям (приращению уровня помех) из-за шумов межсимвольной интерференции (ISI), которые включают в себя перекрестные помехи и шумы синхронизации. То есть  $A_D = a_{ISI}$ . Эти дополнительные потери равны [6]

$$a_{ISI} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp \left[ -1,28 \cdot \left( \frac{T_0}{T_L} \right) \right]} \right\}, \quad (38)$$

Где  $T_0$  - время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника излучения от 10% до 90% его максимального значения, с;

$T_L$  - Время нарастания фронта оптического импульса на выходе оптического приемника от 10% до 90% его максимального значения, с.

Время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника излучения определяется как

$$T_0 = \frac{0,48}{B}. \quad (39)$$

Время нарастания фронта оптического импульса на выходе оптического приемника рассчитывается по формуле

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{BW_R}\right)^2} + \sigma_{ЭКУ}^2. \quad (40)$$

Здесь  $BW_R$  – полоса пропускания фотоприемника, Гц;

$\sigma_{ЭКУ}$  – среднеквадратическое значение дисперсии на ЭКУ, с.

Полоса пропускания фотоприемника выбирается из условия  $BW_R \geq B_L$ .

Прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на номинальной длине ЭКУ рассчитывается по формуле

$$\sigma_{ЭКУ} = \sqrt{D_{НОМ}^2 + PMD_{НОМ}^2} \quad (41)$$

Результаты расчета эксплуатационного запаса на дисперсию для номинальной длины ЭКУ проектируемой ВОЛП сведите в таблицу 11.

Таблица 11

Параметр	Усл. обозн	Значения
Время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника излучения	$T_0$ , пс	
Прогнозируемое значение хроматической дисперсии на номинальной длине ЭКУ	$D_{НОМ}$ , пс	
Прогнозируемое значение ПМД на номинальной длине ЭКУ	$PMD_{НОМ}$ , пс	
Среднеквадратическое значение дисперсии на номинальной длине ЭКУ	$\sigma_{ЭКУ}$ , пс	
Полоса пропускания фотоприемника	$BW_R$ , МГц	
Время нарастания фронта оптического импульса на выходе оптического приемника	$T_L$ , пс	
Эксплуатационный запас на дисперсию (приращение уровня шумов межсимвольной интерференции)	$A_d(a_{ISI})$ , дБ	

## 10. Расчет бюджета мощности

Передача информации с требуемым качеством на регенерационном участке ВОЛП без оптических усилителей, учитывая потери и дисперсионные искажения, обеспечивается за счет запаса мощности (чистого бюджета мощности), равного разности между энергетическим потенциалом ВОСП (перекрываемым затуханием) и затратами оптической мощности на потери и подавление помех и искажений оптических импульсов в линии

$$A_{ЭЗ} = W - A_{ЭКУ} - \sum a_{Шi}, \quad (42)$$

где  $A_{ЭКУ}$  – затухание ЭКУ совместно со стационарными кабелями (патчкордами);

$\sum a_{Шi}$  – суммарное значение дополнительных потерь, дБ.

Для нормальной работы ВОЛП необходимо, чтобы эксплуатационный запас на ЭКУ превышал нормируемое минимально допустимое значение равное

$$A_{ЭЗдоп} = (A_{ЭЗА} + A_{ЭЗК}) \quad (43)$$

То есть, выполнялось условие  $A_{ЭЗ} > A_{ЭЗдоп}$ . Это условие баланса бюджета мощности на ЭКУ.

Максимальное значение затухания ЭКУ совместно со стационарными кабелями (патчкордами) рассчитывается следующим образом:

$$A_{ЭКУ} = \alpha_{МАКС} \cdot L_{НОМ} + N_{НС} \cdot A_{НСмакс} + A_{РС}, \quad (44)$$

где  $N_{НС}$  – число неразъемных соединений ОВ на ЭКУ.  
Количество неразъемных соединений на ЭКУ равно

$$N_{НС} = \frac{L_{МАКС}}{\bar{l}} + 1 \quad (45)$$

Суммарное значение дополнительных потерь складывается из дополнительных потерь за счет собственных шумов лазера, за счет за счет шумов из-за излучения оптической мощности при передаче «нуля», за счет шумов межсимвольной интерференции и, соответственно, равно

$$\sum a_{ш_i} = a_{RIN} + a_{\varepsilon} + a_{ISI} \quad (46)$$

Дополнительные потери из-за собственных шумов источника излучения рассчитываются по формуле

$$a_{RIN} = 10 \lg \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (Q \cdot \sigma_{RIN})^2}} \right] \quad (47)$$

$$\sigma_{RIN}^2 = 4 \cdot BW_R \cdot 10^{\frac{RIN}{10}} \quad (48)$$

Значение параметра собственных шумов источника – RIN обычно лежит в пределах  $-120 < RIN < -140$  дБм.

Параметр  $Q$  определяется в зависимости от заданного максимально допустимого коэффициента ошибок  $BER$  из уравнения

$$BER = \frac{1}{Q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right) \quad (49)$$

Результаты решения уравнения (49) приведены в табл. 12.

Таблица 12

<b>BER</b>	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$
<b>Q</b>	5,99	6,63	6,71	7,04

Дополнительные потери за счет шумов из-за излучения оптической мощности при передаче «нуля» определяются по формуле

$$a_{\varepsilon} = 10 \lg \left( \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right), \quad (50)$$

здесь  $\varepsilon$  - отношение мощности оптического излучения источника при передаче «нуля» к мощности оптического излучения при передаче «единицы». Как правило, значение этой величины лежит в пределах  $0,01 \leq \varepsilon \leq 0,1$ .

Параметр  $\varepsilon$  связан с коэффициентом гашения, равным отношению мощности оптического излучения при передаче логической единицы цифрового сигнала к мощности оптического излучения при передаче логического нуля, выраженным в дБм.

Расчет дополнительных потерь за счет шумов межсимвольной интерференции был рассмотрен ранее в разделе 7 данного пособия.

Результаты расчета бюджета мощности ЭКУ ВОЛП занесите в таблицу 13. Сделайте выводы по результатам расчетов.

Таблица 13

Параметр	Усл. обозн	Значение
Энергетический потенциал	$W$ , дБ	
Затухание ЭКУ совместно со стационарными кабелями	$A_{\text{ЭКУ}}$ , дБ	
Дополнительные потери из-за шумов межсимвольной интерференции	$a_{\text{ISI}}$ , дБ	
Среднеквадратическое значение дисперсии на участке	$\sigma_{\text{ЭКУ}}$ , пс	
Параметр качества	$Q$	
Отношение оптических мощностей при передаче «нуля» и «единицы»	$\varepsilon$	
Дополнительные потери за счет шумов из-за излучения оптической мощности при передаче «нуля»	$a_{\varepsilon}$ , дБ	
Параметр собственных шумов лазера	$RIN$	

Полоса пропускания фотоприемника	$BW_R$ , МГц	
Параметр собственных шумов лазера	$\sigma_{RIN}$	
Дополнительные потери из-за собственных шумов лазера	$a_{RIN}$ , дБ	
Суммарное значение дополнительных потерь	$\sum a_{ш_i}$ , дБ	
Чистый бюджет мощности	$A_{ЭЗ}$ , дБ	
Требуемый эксплуатационный запас	$A_{ЭЗдоп}$ , дБ	

Сделайте выводы по результатам расчетов. Если требования по запасу мощности не выполняются, то проанализируйте причины. Определите факторы в наибольшей мере влияющие на ухудшение отношения сигнал/помеха (потери или дисперсия оптического волокна, свойства оборудования). Дайте рекомендации, выполнение которых позволит выполнить предъявляемые требования (замена оптического волокна, установка оптических усилителей, компенсаторов дисперсии или регенераторов, замена оборудования).

## 11. Определение максимально допустимой скорости передачи на ЭКУ

Воспользовавшись описанной выше методикой, рассчитайте дополнительные потери и чистый бюджет мощности (прогнозируемый эксплуатационный запас) для номинальной длины ЭКУ в зависимости от скорости передачи линейной кодовой последовательности, увеличивая скорость передачи с кратностью равной четырем. По результатам расчетов заполните таблицу 14. Постройте графики зависимостей  $a_{ISI}(B)$ ,  $a_{RIN}(B)$ ,  $A_{ЭЗ}(B)$ . На графике зависимости  $A_{ЭЗ}(B)$  проведите прямую, соответствующую нормируемому значению эксплуатационного запаса на ЭКУ.

Определите максимально допустимое значение скорости передачи по графику в точке пересечения зависимости  $A_{ЭЗ}(B)$  с этой прямой.

Таблица 14

Кратность	1	4	16	64	256	1024
В, Гбит/с	0,155	0,622	2.5	10	40	160
$a_{ISI}=A_{Д}$ , дБ						
$a_{RIN}$ , дБ						
$A_{ЭЗ}$ , дБ						
Нормируемый эксплуатационный запас на ЭКУ $A_{ЭЗ}=6$ дБ						

## 12. Расчет глаз-диаграммы

Глаз-диаграмма представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени. Пример глаз-диаграммы представлен на рис.17.

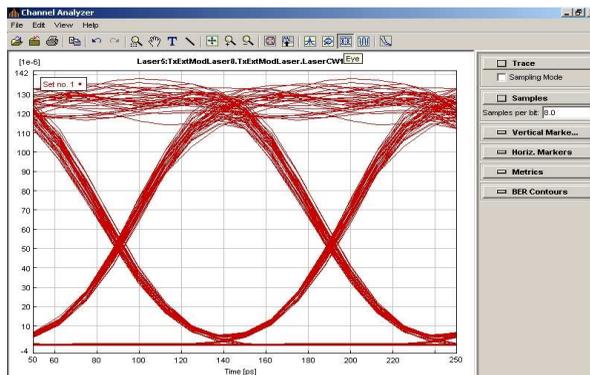


Рис. 17. Глаз-диаграмма, полученная с помощью анализатора канала.

Предварительно вычислите уровень мощности источника оптического излучения лазера, дБ:

$$p_0 = 10 \lg \left( \frac{P_0}{10^{-3}} \right), \text{ дБ}, \quad (51)$$

где  $P_0$  – уровень мощности на выходе источника оптического излучения.

Уровень мощности оптического сигнала на входе фотоприемника ОСП определяется суммарными потерями в ОВ на ЭКУ ВОЛП а также суммарным значением дополнительных потерь:

$$P_L = p_0 - A_{ЭКУ} - \sum a_{ш}, \text{ дБ}. \quad (52)$$

Приведенная ко входу фотоприемника ОСП мощность оптического сигнала в мВт:

$$P_L = 10^{0,1 \cdot p_L}, \text{ мВт}. \quad (53)$$

Для расчета помехозащищенности канала ЦСП необходимо также оценить мощность шума фотоприемника  $P_{noise}$ . На практике фотоприемные устройства высокоскоростных ОСП проектируются таким образом, чтобы логарифм отношения полосы пропускания электрического фильтра к полосе пропускания оптического фильтра составлял не менее 2 дБ [6]. В этом случае выполняется следующее условие по отношению сигнал/шум:

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{НОМ}) + 2, \text{ дБ}, \quad (54)$$

где  $OSNR$  – оптическое отношение сигнал/шум (Optical Signal-to-Noise Ratio);

$Q_{ном}$  – номинальное значение Q-фактора, соответствующего нормированному коэффициенту ошибок  $BER_{ном}$  (см. табл. 12).

Согласно определению [1], уровень чувствительности фотоприемника ОСП – это минимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. С учетом вышесказанного, а также используя условие (6.4), максимальный уровень мощности шума фотоприемника  $p_{noise}$  можно оценить по следующей формуле:

$$P_{noise} = P_R - 20 \cdot \lg(Q_{ном}) - 2, \text{ дБ}, \quad (55)$$

где  $p_R$  – уровень чувствительности фотоприемника, дБ;

$p_{noise}$  – уровень шума фотоприемника, дБ.

Чувствительность фотоприемника и мощность шума в мВт рассчитывается как

$$P_R = 10^{0,1 \cdot p_R}, \text{ мВт};$$

$$P_{noise} = 10^{0,1 \cdot p_{noise}}, \text{ мВт}. \quad (56)$$

Построение глаз-диаграммы осуществляется путем наложения отклика системы в предположении гауссовой формы импульса на передачу «изолированного» логического «0» в последовательности логических «1» (например, комбинация 101 – при 3-х символьной последовательности) [2,12]:

$$P_{out}^{''0''}(t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\} \quad (57)$$

и отклика системы на передачу «изолированной» логической «1» в последовательности логических «0» (например, комбинация 010 – при 3-х символьной последовательности) [6]

$$P_{out}^{''1''}(t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (58)$$

где  $s_L$  - среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП; данная величина непосредственно связана с  $T_L$  следующим соотношением:

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с}; \quad (59)$$

$T$  – интервал передачи битовой последовательности:

$$T = N_{symp} \cdot \tau_{05}, \text{ с}, \quad (60)$$

где  $N_{symp}$  – количество символов битовой последовательности, в данном случае принять  $N_{symp} = 3$ ;

$\tau_{05}$  – длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения; обратно пропорциональна скорости передачи сигнала в линии:

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}, \text{ с}. \quad (61)$$

Выполните построение глаз-диаграммы в диапазоне  $(-2T; 2T)$ . На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника  $P_L$  и чувствительность фотоприемника  $P_R$  – одного порядка). Пример построения глаз-диаграммы по результатам расчета представлен на рис. 18.

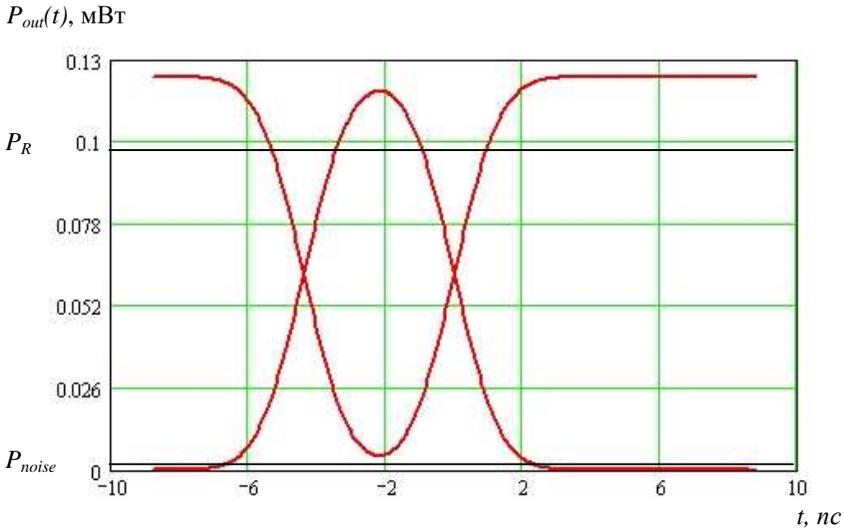


Рис. 18. Пример построения глаз-диаграммы.

Фундаментальным показателем качества цифровых систем передачи является коэффициент ошибок  $BER$ . Работа цифровых систем передачи считается нормальной только в том случае, если  $BER$  не превышает определенное допустимое значение, соответствующее используемому сетевому стандарту.

Известна методика оценки коэффициента ошибок  $BER$  на основе определения Q-фактора. Q-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП. Существует определенная функциональная зависимость Q-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок  $BER$ . Q-

фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрической уровне, а именно – непосредственно по глаз-диаграмме. При этом выполняется построение функции распределения состояний «1» и «0», а для этих распределений, в предположении их Гауссовой формы, оцениваются математические ожидания состояний  $E1$  и  $E0$  и их среднеквадратические отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  (рис. 19.) [8].

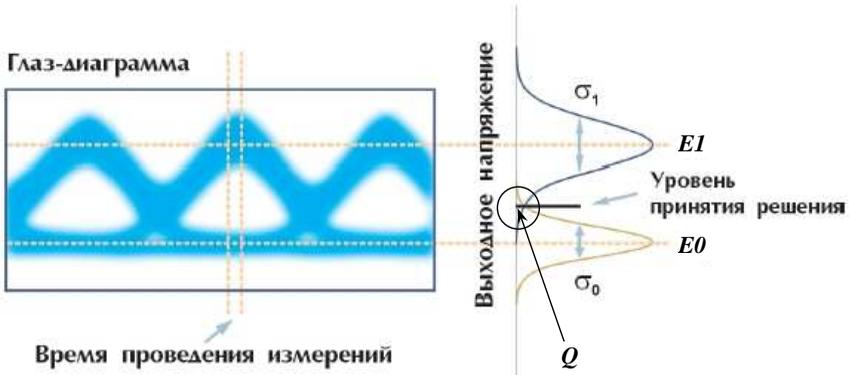


Рис. 19. К оценке Q-фактора.

Предварительно, для оценки параметров распределений состояний «1» и «0», определите точку максимального раскрыва глаз-диаграммы (рис. 20.):

$$\tau_{open} = \ln \left[ \frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_{out}^2}\right)}} \right] \cdot \frac{s_L^2}{T}, \text{ с.} \quad (62)$$

Рассчитайте границы раскрыва глаз-диаграммы (зоны принятия решения), соответствующие минимальной зарегистриро-

ванной мощности при передаче логической «1»  $P_{I_{min}}$  и максимальной зарегистрированной мощности при передаче логического «0»  $P_{O_{max}}$ :

$$\begin{aligned}
 P_{I_{min}} &= P_{out}^{''1''}(\tau_{open}), \text{ мВт} \\
 P_{O_{max}} &= P_{out}^{''0''}(\tau_{open}), \text{ мВт}
 \end{aligned}
 \tag{63}$$

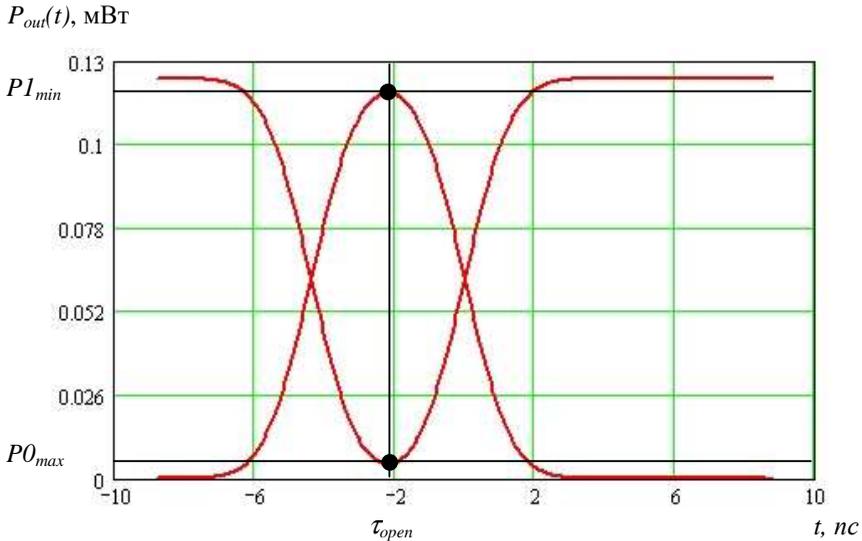


Рис. 20. К оценке параметров распределений логических состояний «1» и «0».

Исходя из предположения гауссова распределения состояний логической «1» и логического «0», определите характеристики распределений состояний – математическое ожидание  $E1$  и  $E0$ :

$$E1 = \begin{cases} P_L, & P_L \geq P_R \\ P_R, & P_L < P_R \end{cases}, \text{ мВт}
 \tag{64}$$

$$E0 = P_{noise}, \text{ мВт}
 \tag{65}$$

и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$ , соответственно, воспользовавшись правилом «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3}, \text{ мВт} \quad (66)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3}, & E0 \leq P0_{\max} \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3}, & E0 > P0_{\max} \end{cases}, \text{ мВт.} \quad (67)$$

Q-фактор рассчитывается по следующей формуле [4, 6]:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (68)$$

При этом сам коэффициент ошибок *BER* определяется по следующей формуле [4, 6]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (69)$$

где *erfc* – вспомогательная функция интеграла ошибок:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta. \quad (70)$$

Необходимо отметить, что приближенная формула расчета  $BER$ , справедлива при значениях аргумента  $erfc$  больше 3, иными словами, только при выполнении условия:

$$\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3. \quad (71)$$

Выполните построение глаз-диаграммы в диапазоне  $(-2T; 2T)$  канала цифровой ОСП заданного стандарта. На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника  $P_L$  и чувствительность фотоприемника  $P_R$  – одного порядка). Пример построения глаз-диаграммы по результатам расчета представлен на рис. 18.

Рассчитайте показатели качества канала исследуемой цифровой ОСП заданного стандарта. Результаты расчета занесите в табл. 15. Сравните рассчитанные по построенной глаз-диаграмме коэффициенты ошибок  $BER$  с номинальным допустимым значением  $BER_{ном}$ , соответствующим заданному стандарту.

Таблица 15.

№ пп	Параметр	Ед. изм.	Значения
1	$\tau_{open}$	пс	
2	$PI_{min}$	мВт	
3	$PO_{max}$	мВт	
4	$E1$	мВт	
5	$E0$	мВт	
6	$\sigma_1$	мВт	
7	$\sigma_0$	мВт	
8	$Q$		
9	$BER$		

## Литература

1. ОСТ 45.190-2001 Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения. – М.: Издание официальное, ЦНТИ «ИНФОРМСВЯЗЬ», 2002.- 14с.
2. Нормы приемо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования. Утверждены приказом Госкомсвязи России №97 от 17.12.97.
3. Рекомендация G957 МСЭ-Т Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи, относящихся к синхронной цифровой иерархии.
4. Рекомендация G651 МСЭ-Т Оптические стыки для одноканальных систем с оптическими усилителями.
5. Рекомендация G652 МСЭ-Т Характеристики одноимодовых волоконно-оптических кабелей.
6. Гринфилд Д. Оптические сети. – К.: ООО «ТИД «ДС», 2002. – 256 с.
7. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и Связь, 2000. -468 с.
8. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети.-М.: Эко-Трендз, 1998.
9. Складов О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 237 с.
10. Воронцов А. С., Гурин О. И., Мифтяхетдинов С. Х., Никольский К. К., Питерских С. Э. Оптические кабели связи российского производства. Справочник. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
11. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. – М.: ЛЕСАРарт, 2003. – 288 с.
12. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. - М.: ЛОРИ, 1998.

13. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.-М.: САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
14. Kartalopoulos S. V. Introduction to DWDM technology. Data in a Rainbow.- USA.: SPIE optical engineering press, IEEE press.- 2000.- p.252.
15. Кабели, провода и материалы для кабельной индустрии: технический справочник /Составление и редактирование: Кузнецов В.Ю., Крехова О.В. – М.: Нефть и газ, 1999, 304с.
16. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник / Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. и др. –М.: Радио и связь, 1993.-264с.
17. Гауэр Дж. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь,1989.-504с.
18. Слепов Н.Н. Параметры промышленных одномодовых оптических волокон // Вестник связи, 1999, №11.
19. Оптические системы передачи: Учебник для ВУЗов / Б.В. Скворцов, В.И. Иванов, В.В. Крухмалев и др.; Под ред. В.И. Иванова. – М.: Радио и связь, 1994. – 224с.
20. Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 283 с.

## Приложение 1

### Технические данные промышленных оптических волокон

Фирма и страна–изготовитель ОВ		Corning (США)	OFS allwave (США)	Hitachi Cable (Япония)	Fujikura (Япония)	Sumitomo Electric (Япония)	Alcatel (Франция)	Samsung Electronics (Р.Корея)
Фирменное обозначение		SMF-28e	SM 332	SM 8/125	SM 9/125	Pure Band	Alcatel 6900	SF-SMF
Тип волокна		SSF	SSF	SSF	SSF	SSF	SSF	SSF
Соответствие стандарту ITU-T		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652	G.652	G.652
Макс. потери, дБ/км	1,31 мкм	0,34	0,35	0,40	0,34	0,33	0,40	0,37
	1,383 мкм	0,30	1,00	0,65	1,50	0,29	0,60	0,55
	1,55 мкм	0,20	0,25	0,25	0,24	0,19	0,25	0,25
Максимальный прирост затухания относительно опорной длины волны в рабочем диапазоне волн.		0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,09	0,03

Длина волны нулевой дисперсии $\lambda_0$ , (мкм)		1,301–1,321	1,300–1,322	1,300–1,324	1,301–1,322	1,300–1,312	1,300–1,320	1,302–1,322
Наклон нулевой дисперсии, $S_0$ (пс/нм <sup>2</sup> ·км)		0,092	0,092	0,092	0,092	0,086	0,092	0,091
Макс. дисперсия поляризованной моды (PMD), пс/нм <sup>1/2</sup>		0,20	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,20
Диаметр сердцевины, мкм		8,3	8,5	8,3	8,9	8,7	8,8	8,5
Числовая апертура		0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,137
Групповой показатель преломления	1,31 мкм	1,4675	1,4641	1,474	1,4640	1,4667	1,4668	1,4690
	1,55 мкм	1,4681	1,4646	1,4680	1,4645	1,4670	1,4671	1,4695
Профиль показателя преломления		ступенчатый						
Диаметр оболочки, мкм		125±1	125±1	125±1	125±1	125±1	125±1	125±1
Диаметр покрытия, мкм		245±5	245±5	245±5	245±5	245±5	242±7	245±10

### Основные термины и определения

Представленные ниже определения базируются в основном на утвержденных нормативных документах [1 – 5].

**Волоконно-оптическая система передачи (ВОСП)** – система передачи, в которой все виды сигналов передаются по волокнам оптического кабеля.

**Оптический канал** – комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу оптического сигнала в диапазоне длин волн, характерном для данного канала.

**Оптический стык** – совокупность технических средств и правил, обеспечивающих взаимодействие последовательно соединенных компонентов ВОСП.

**Оптическая цепь** – совокупность компонентов ВОСП, соединенных таким образом, чтобы обеспечить передачу оптического сигнала между ними.

**Оптический полюс** – место ввода или вывода оптического излучения в компонент.

**Оптический тракт** – участок оптической цепи между последовательно соединенными передатчиком и приемником ВОСП без оптических усилителей.

**Элементарный кабельный участок (ЭКУ)** – вся физическая среда передачи между соседними окончаниями участка.

Здесь под физической средой подразумевается совокупность оптического волокна линейного кабеля и его сростков в точках соединения строительных длин, оптического волокна стационарных кабелей и их сростков с линейными оптическими волокнами, а также кроссовых оптических шнуров.

**Окончание участка (элементарного кабельного)** – граница, выбранная произвольно в качестве стыка оптического волокна с регенератором (усилителем).

**Точка нормирования** – точка оптического тракта, в которой нормируются параметры оптического стыка. В частности, нормирование оптического стыка осуществляется на передаче оптического тракта (точка Пд или точка S) и на приеме оптического тракта (точка Пр или точка R).

**Передатчик ВОСП** – совокупность передающего оптоэлектронного модуля с дополнительными устройствами преобразования электрического сигнала.

**Приемник ВОСП** – совокупность приемного оптоэлектронного модуля с дополнительными устройствами преобразования электрического сигнала.

**Оптический кабель (ОК)** – кабельное изделие, содержащее одно или несколько оптических волокон, объединенных в единую конструкцию, обеспечивающую их работоспособность в заданных условиях эксплуатации.

**Стационарный оптический кабель** – ОК, предназначенный для соединения компонентов ВОСП в оптической цепи на станции.

**Линейный оптический кабель** – ОК, предназначенный для соединения компонентов ВОСП в оптической цепи между станциями.

**Перекрываемое затухание** – допустимые оптические потери оптического тракта или ЭКУ между точками нормирования, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. Оптические потери обусловлены потерями на затухание и дополнительными потерями мощности.

**Дополнительные потери мощности** – оптические потери оптического тракта между точками нормирования на передаче и приеме, обусловленные влиянием отражений, дисперсии (хроматической и поляризационной модовой), модовых шумов и чирп-эффекта.

**Средняя мощность оптического излучения** – среднее значение мощности оптического излучения при модуляции оптической несущей цифровым сигналом.

**Уровень мощности оптического излучения** – средняя мощность оптического излучения, выраженная в дБм.

**Уровень чувствительности приемника** – минимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала.

**Уровень перегрузки приемника** – максимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала.

**Отношение оптического сигнала к оптическому шуму** – отношение средней мощности оптического излучения сигнала к средней мощности оптического излучения шума в полосе частот оптического диапазона, выраженное в дБм.

**Коэффициент гашения** – отношение мощности оптического излучения при передаче логической единицы цифрового сигнала к мощности оптического излучения при передаче логического нуля, выраженное в дБм.

**Центральная частота (оптического канала)** – центральная частота диапазона частот (длин волн), отведенного для передачи оптического сигнала отдельного оптического канала.

**Ширина линии излучения лазера** – ширина спектра оптического излучения передатчика ВОСП при постоянной величине тока накачки лазера.

**Импульсное смещение частоты источника излучения (чирп-эффект)** – изменение частоты (длины волны) источника излучения во время нарастания и спада импульса цифрового сигнала, модулирующего ток накачки.

**Хроматическая дисперсия** – изменение формы огибающей оптического сигнала, обусловленное зависимостями постоянной распространения моды оптического сигнала и показателя преломления оптического волокна от длины волны. По другому, это увеличение длительности оптических импульсов, обусловленное различием скоростей распространения его спектральных составляющих.

**Поляризационная модовая дисперсия** – изменение формы огибающей оптического сигнала, обусловленное различием скоростей распространения двух взаимноперпендикулярных поляризационных модовых составляющих.