**ВВЕДЕНИЕ**

Современная эпоха характеризуется стремительным процессом информатизации общества. Это сильней всего проявляется в росте пропускной способности и гибкости информационных сетей. Полоса пропускания в расчете на одного пользователя стремительно увеличивается благодаря нескольким факторам. Во-первых, растет популярность приложений World Wide Web и количество электронных банков информации, которые становятся достоянием каждого человека. Падение цен на персональные компьютеры приводит к росту числа домашних ПК, каждый из которых потенциально превращается в устройство, способное подключиться к сети Internet. Во-вторых, новые сетевые приложения становятся все более "прожорливыми" в отношении полосы пропускания – входят в практику разнообразные приложения Internet, ориентированные на мультимедиа и видеоконференцсвязь, когда одновременно открывается очень большое количество сессий передачи данных. Как результат, наблюдается резкий рост в потреблении ресурсов Internet – по оценкам средний объем потока информации в расчете на одного пользователя в мире увеличивается в 8 раз каждый год. Следует дополнительно отметить, что и сама коммуникационная индустрия является поставщиком гетерогенных коммуникационных служб, способствуя мировой информационной интеграции и возрастанию нагрузки на сеть.

В достаточной мере отвечать растущим объемам передаваемой информации на уровне сетевых магистралей можно используя оптическое волокно. И поставщики средств связи при построении современных информационных сетей используют волоконно-оптические кабельные системы наиболее часто. Это касается как построения протяженных телекоммуникационных магистралей, так и локальных вычислительных сетей. Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Волоконная оптика, став главной рабочей лошадкой процесса информатизации общества, обеспечила себе гарантированное развитие в настоящем и будущем. Сегодня волоконная оптика находит применение практически во всех задачах, связанных с передачей информации. Стало допустимым подключение рабочих станций к информационной сети с использованием волоконно-оптического миникабеля. Однако, если на уровне настольного ПК волоконно-оптический интерфейс только начинает единоборство с проводным, то при построении магистральных сетей давно стало фактом безусловное господство оптического волокна. Коммерческие аспекты оптического волокна также говорят в его пользу – волокно изготавливается из кварца, то есть на основе песка, запасы которого очень велики. [2]

В настоящем курсовом проекте производится расчет параметров оптического волокна SM - 9/125 фирмы Lucent Technologies. Это одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Вообще одномодовые волокна используются для создания кабелей магистральных линий связи в следствии их большой полосы пропускания, а так же при создании различных измерительных приборов (например, интерферометров).

При строительстве наземных магистральных линий связи на основе кабелей с одномодовыми оптическими волокнами длина регенерационных участков составляет 100 – 150 км. В настоящем курсовом проекте было взято значение 100 км.

**1 ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО**

**1.1 Типы оптических волокон**

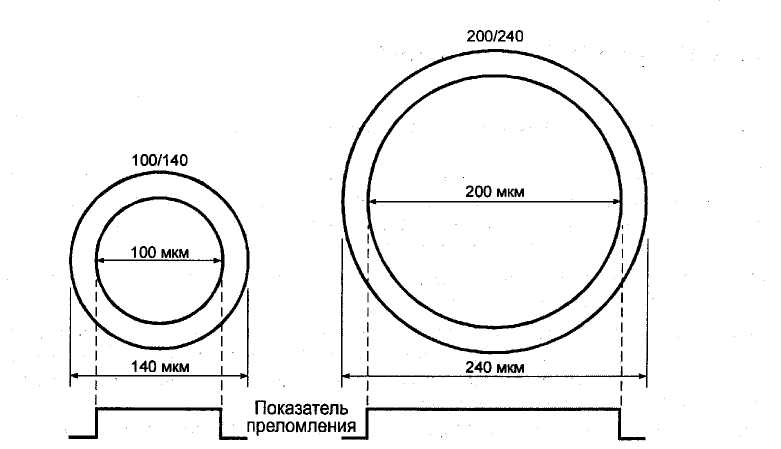
Оптические волокна производятся разными способами, обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber).

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые (step index multi mode fiber) и градиентные (graded index multi mode fiber).

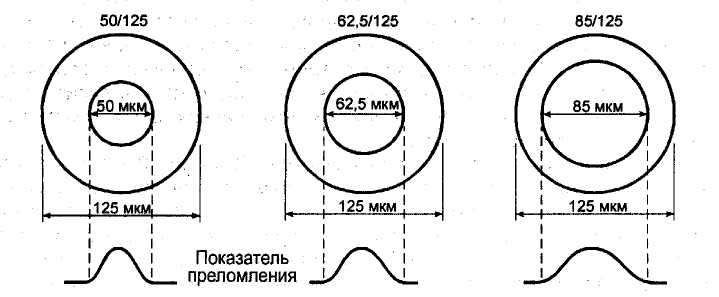
Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна (step in­dex single mode fiber) или стандартные волокна SF (standard fiber), на волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion-shifted single mode fiber), и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (non-zero dispersion-shifted single mode fiber). [2]

Типы и размеры волокон приведены на рисунке 1. Каждое волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления. Сердцевина, по которой происходит рас­пространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала. При обозначении волокна указываются через дробь значения диаметров сердцевины и обо­лочки. Волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины. У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевины зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для улучшения технических характеристик или для дости­жения специальных характеристик волокна.

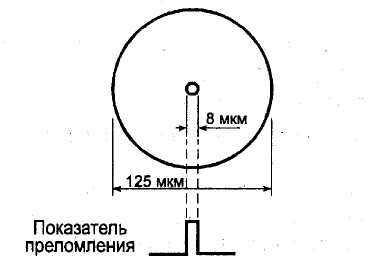
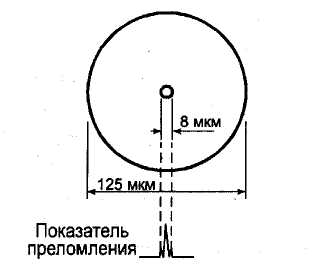
Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рисунок 1 а, б), то градиентное волокно имеет лучшие технические характеристики, чем ступенчатое, по дисперсии. Главным образом это связано с тем, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне - основной источник дисперсии - значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом во­локне, что приводит к большей пропускной способности у градиентного волокна.



а) многомодовое ступенчатое волокно



б) многомодовое градиентное волокно



в) ступенчатое одномодовое г) одномодовое волокно

волокно (SF) со смещенной дисперсией (DSF)

Рисунок 1 – Типы оптических волокон

Одномодовое волокно имеет значительно меньший диаметр сердцевины по сравнению с многомодовым и, как следствие, из-за отсутствия межмодовой дисперсии, более высокую пропускную способность. Однако оно требует использования более дорогих лазерных передатчиков.

В ВОЛС наиболее широко используются следующие стандарты волокон (таблица 1):

многомодовое градиентное волокно 50/125 (рисунок 1 а);

многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рисунок 1 б);

одномодовое ступенчатое волокно SF (волокно с несмещенной дисперсией или стандартное волокно) 8-10/125 (рисунок 1 в);

одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125 (рисунок 1 г);

одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с предыдущим типом волокна).

Таблица 1 – Стандарты оптических волокон и области их применения

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Многомодовое волокно | | Одномодовое волокно | | |
| MMF 50/125 градиентное волокно | MMF 62,5/125  градиентное волокно | SF (NDSF)  ступенчатое волокно | DSF  волокно со смещенной дисперсией | NZDSF  волокно с ненулевой смещенной дисперсией |
| ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM) | ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM) | Протяженные сети (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM), магистрали SDH) | Сверхпротяженные сети, супермагистра­ли (SDH, ATM) | Сверхпротяженные сети, супермагистра­ли (SDH, ATM), полностью оптические сети |

Большинство устройств волоконной оптики используют область инфракрасного спектра в диапазоне от 800 до 1600 нм в основном в трех окнах прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм. Именно окрестности этих трех длин волн образуют локальные минимумы затухания сигнала и обеспечивают большую дальность передачи.

**Многомодовые градиентные волокна**

В стандартном многомодовом градиентном волокне (50/125 или 62,5/125) диаметр светонесущей жилы 50 и 62,5 мкм, что на порядок больше длины волны передачи. Это приводит к распространению множества различных типов световых лучей - мод - во всех трех окнах прозрачности. Два окна прозрачности 850 и 1310 нм обычно используют для передачи света по многомодовому волокну.

**Одномодовые волокна**

*В ступенчатом одномодовом волокне* (SF) диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны света *λ> λ CF (λ* > *λ CF* – длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в одномодовом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время как наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

*В одномодовом волокне со смещенной дисперсией* (DSF) длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль, – длина волны нулевой дисперсии *λ**о* – смещена в окно 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рисунок 1 г. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных сегментов с расстоянием между ретрансляторами до 100 и более км. Разумеется, единственная рабочая длина волны берется близкой к 1550 нм.

*Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией* NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн (мультиплексного волнового сигнала) и наиболее эффективно может использоваться при построении магистралей "полностью оптических сетей" – сетей, на узлах которых не происходит опто-электронного преобразования при распространении оптического сигнала.

Передача мультиплексного сигнала на большие расстояния требует использования линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили так называемые *эрбиевые усилители* на основе легированного эрбием волокна (EDFA). Линейные усилители типа EDFA эффективно могут усиливать сигнал в своем рабочем диапазоне от 1530-1560 нм. Длина волны нулевой дисперсии у волокна NZDSF, в отличие от волокна DSF, выведена за пределы этого диапазона, что значительно ослабляет влияние нелинейных эффектов в окрестности точки нулевой дисперсии при распространении нескольких длин волн.

Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых волокон совершенно не означает, что они всегда должны использоваться исключительно под определенные задачи: SF – передача сигнала на длине волны 1310 нм, DSF – передача сигнала на длине волны 1550 нм, NZDSF – передача мультиплексного сигнала в окне 1530-1560 нм. Так, например, мультиплексный сигнал в окне 1530-1560 нм можно передавать и по стандартному ступенчатому одномодовому волокну SF. Однако длина безретрансляционного участка при использовании волокна SF будет меньше, чем при использовании NZDSF, или иначе потребуется очень узкая полоса спектрального излучения лазерных передатчиков для уменьшения результирующей хроматической дисперсии. Максимальное допустимое расстояние определяется техническими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией), так и приемопередающего оборудования (мощностью, частотой, спектральным уширением излучения передатчика, чувствительностью приемника).

**1.2 Распространение света по волокну**

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в волокне, наряду с длиной волны излучения, являются: геометрические параметры волокна; затухание; дисперсия.

**Геометрические параметры волокна**

*Относительная разность показателей преломления.* Волокно состоит из сердцевины и оболочки. Оболочка окружает оптически более плотную сердцевину, являющуюся светонесущей частью волокна, рисунок 2.

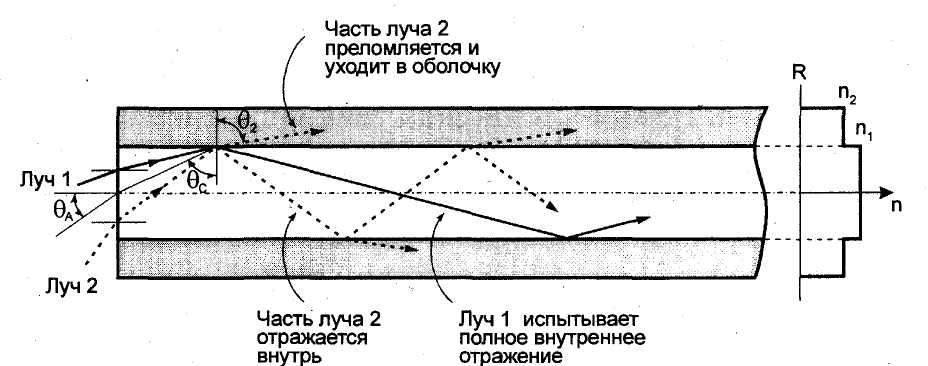


Рисунок 2 – Ход лучей в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем

Будем обозначать через *n1* и *n2* показатели преломления сердцевины и оболочки, соответственно. Один из важных параметров, который характеризует волокно, это – относительная разность показателей преломления *Δ*:



(1)

Если показатель преломления оболочки выбирается всегда постоянной величиной, то показатель преломления сердцевины в общем случае может зависеть от радиуса. В этом случае для проведения различных оценок параметров волокна вместо *n1* используют *n1eff*

Распространение света по волокну можно объяснить на основе принципа полного внутреннего отражения, вытекающего из закона преломления света Снеллиуса:



(2)

где *n1* – показатель преломления среды 1, *Θ1* – угол падения, *n2* – показатель преломления среды 2, *Θ2* – угол преломления.

Формальные выкладки удобнее производить для ступенчатого волокна (волокна со ступенчатым профилем показателя преломления), в котором показатель преломления сердцевины является постоянной величиной (*n1 = const*). На рисунке 2 показан ход лучей в таком волокне. Так как сердцевина является оптически более плотной средой по отношению к оболочке (*n1* > *n2*), то существует критический угол падения *ΘС* - внутренний угол падения на границу, при котором преломленный луч идет вдоль границы сред (*Θ2 = 90°*). Из закона Снеллиуса легко найти этот критический угол падения:



(3)

Если угол падения на границу раздела меньше критического угла падения (луч 2), то при каждом внутреннем отражении часть энергии рассеивается наружу в виде преломленного луча, что приводит в конечном итоге к затуханию света. Если же угол падения больше критического угла (луч 1), то при каждом отражении от границы вся энергия возвращается обратно в сердцевину благодаря полному внутреннему отражению.

*Лучи, траектории которых полностью лежат в оптически более плотной среде, называются направляемыми.* Поскольку энергия в направляемых лучах не рассеивается наружу, такие лучи могут распространяться на большие расстояния.

*Числовая апертура.* Важным параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура *NA*. Она связана с максимальным углом *ΘА* вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну, формулой: [1]



(4)

Фирмы-изготовители волокна экспериментально измеряют угол *ΘА* и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна. Для волокна со ступенчатым профилем легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления:



(5)

Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевины и оболочки. Для градиентного волокна с параболическим профилем показателя преломления, определяется эффективная числовая апертура, которая равна



(6)



где *n1(0)* - максимальное значение показателя преломления на оси.

*Нормированная частота.* Другим важным параметром, характеризующим волокно и распространяющийся по нему свет, является *нормированная частота V*, которая определяется как



(7)

где d - диаметр сердцевины волокна. [1]

*Номенклатура мод.* При более строгом рассмотрении процесса распространения света по волокну следует решать волновые уравнения Максвелла. Именно в этой трактовке лучи ассоциируются с волнами, причем различные типы волн – решения уравнений – называются *модами.* Сами моды обозначаются буквами *Е* и/или *Н* с двумя индексами *n*и*m* (Еnm и Нnm). Индекс *n* характеризует азимутальные свойства волны (число изменений поля по окружности), a*m*- радиальные (число изменений поля по диаметру). По оптическому волокну распространяются только два типа волн: симметричные (*Е0m* и *Н0m*), у которых только одна продольная составляющая, и несимметричные (смешанные) (*Enm* и *Hnm*), у которых имеется две продольные составляющие. При этом, если преобладает продольная составляющая электрического поля – *Ez*, то волна обозначается *EHnm*, а если преобладает продольная составляющая магнитного поля – *Hz*, то волна называется *HEnm*. Сопоставляя волновую теорию с геометрической оптикой, следует отметить, что симметричные моды *Е0m* и *Н0m* соответствуют меридиональным лучам, несимметричные моды *Enm* и *Hnm* – косым лучам.

По волокну могут распространяться как только одна мода – одномодовый режим, так и много мод – многомодовый режим. Многомодовый или одномодовый характер идущего по волокну света коренным образом влияет на дисперсию, а следовательно, и на пропускную способность волокна. Расчет на основе уравнений Максвелла позволяет найти простой критерий распространения одной моды:

*V < 2,405*, (8)

(точное значение константы в правой части неравенства определяется первым нулем функции Бесселя *I0(х)*, [1]). Это гибридная мода *НЕ11*. Отметим, что нормированная частота явно зависит от длины волны света. В таблице 2 приведены значения нормированной частоты, вычисленные по формуле (7).

Как видно из таблицы 2, в одномодовом ступенчатом волокне при длине волны света 1550 нм выполняется критерий (8), и поэтому распространяется только одна мода. При длине волны 1310 нм критерий не выполнен, что означает возможность распространения нескольких мод в одномодовом волокне на этой длине волны. На практике, однако, волокно помещается в кабель, который, будучи проложенным, имеет множество изгибов. Особенно велики искривления волокна в сплайс-боксах. Искривление волокна приводит к быстрому затуханию неосновных мод. Во всех остальных случаях наблюдается многомодовый характер распространения света. Отметим, что при длине волны 850 нм критерий (8) нарушается для всех типов волокон. Таким образом, если вводить излучение длиной волны 850 нм в одномодовое волокно, то иметь место будет многомодовый режим распространения света. Противоречия здесь нет. Дело в том, что ступенчатое одномодовое волокно 8/125 предназначено для использования в спектральных окрестностях двух длин волн:1310 нм и 1550 нм, где оно в истинном смысле проявляет себя как одномодовое.

Таблица 2 – Значения основных оптических параметров волокон и нормированной частоты V для различных длин волн [2]

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№** | **Оптическое волокно** | | | | ***λ* (нм)** | | |
| **Название и диаметр** | **Δ (%)** | **n1** | **NA** | **1550** | **1310** | **850** |
| **1** | step MMF 200/240 | - | - | 0,39 | V=158,09 | 187,06 | 288,29 |
| **2** | step MMF 100/140 | - | - | 0,29 | 58,77 | 69,54 | 107,18 |
| **3** | grad MMF 62,5/125 | 2,1 | 1,47 | 0,28 | 35,46 | 41,96 | 64,67 |
| **4** | grad MMF 50/125 | 1,25 | 1,46 | 0,20 | 20,26 | 23,98 | 36,95 |
| **5** | stestep SMF (SF) 8,3/125 | 0,36 | 1,468 | 0,13 | 2.187 | 2.588 | 3,990 |

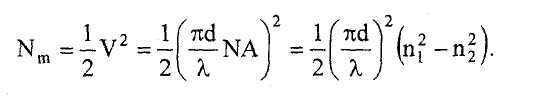
*Обозначения:* step **MMF** (multi mode fiber) – ступенчатое многомодовое волокно; step **SMF** (single mode fiber) – ступенчатое одномодовое волокно; grad MMF – градиентное многомодовое волокно;

*Количество мод.* Если при *V < 2,405* может распространяться только одна мода, то с ростом V количество мод начинает резко расти, причем новые типы мод "включаются" при переходе *V* через определенные критические значения, таблица 3.

Таблица 3 – Номенклатура мод низких порядков [2]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Нормированная частота** *V* | **Число**  **Мод *Nm*** | **Типы мод** |
| 0 - 2,405 | 1 | HE11 - основная мода (единственная допустимая для одномодово-го волокна) |
| 2,405 - 3,832 | 4 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21 |
| 3,832- 5,136 | 7 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31 |
| 5,136-5,52 | 9 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31, EH21, HE41 |
| 5,52 - 6,38 | 12 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31, EH21, HE41, Н02, Е02, НЕ22 |
| 6,38 - 7,02 | 14 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31, EH21, HE41, Н02, Е02, НЕ22. ЕН31, НЕ51 |
| 7,02 - 7,59 | 17 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31, EH21, HE41, Н02, Е02, НЕ22. ЕН31, НЕ51, НЕ13. EH12, НЕ31 |
| 7,59 - 8,42 | 19 | НЕ11, Н01, E01, НЕ21, НЕ12. EH11 HE31, EH21, HE41, Н02, Е02, НЕ22. ЕН31, НЕ51, НЕ13. EH12, НЕ31, ЕН41, HE61 |

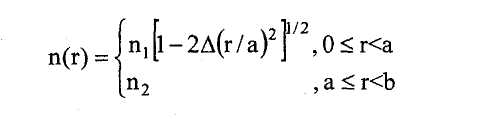
При больших значениях V количество мод Nm для ступенчатого волокна можно оценить по формуле:



(9)

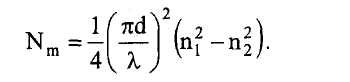
Значение этого выражения может быть как целым, так и дробным. В действительности же число мод может быть только целым и составлять величину от одной до нескольких тысяч.

Количество мод для градиентного оптического волокна с параболическим профилем сердцевины:



(10)

(а - радиус сердцевины, b - радиус оболочки) определяется так: [1]



(11)

На рисунке 3 показана общая картина распространения света по разным типам световодов: многомодовому ступенчатому, многомодовому градиентному, и одномодовому ступенчатому волокну.

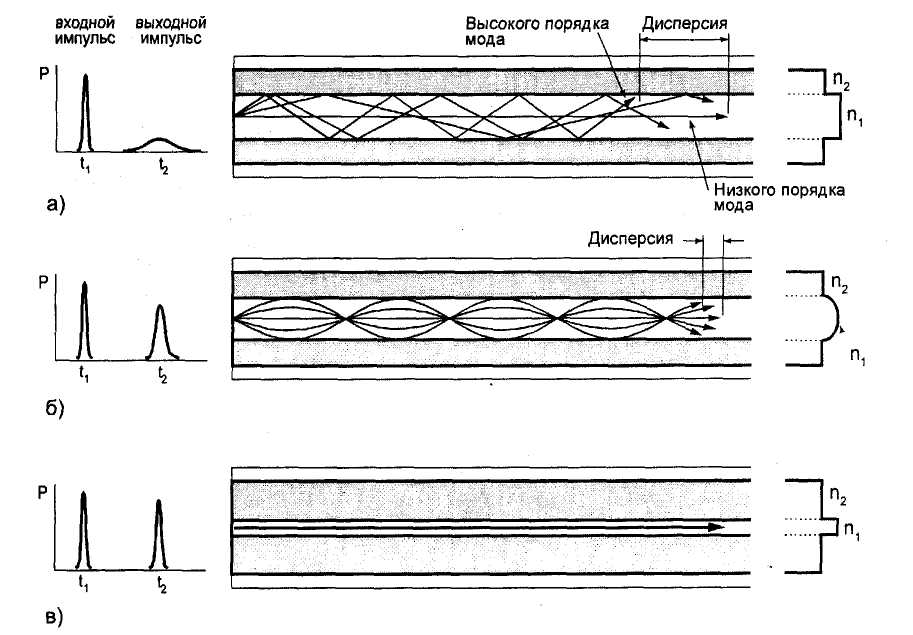


Рисунок 3 – Распространение света по разным типам волокон:

а) многомодовое ступенчатое волокно,

б) многомодовое градиентное волокно,

в) одномодовое ступенчатое волокно.

**Длина волны отсечки (cutoff wavelength)**

Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется *длиной волны отсечки.* Этот параметр характерен для одномодового волокна. Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения света. В этом случае появляется дополнительный источник дисперсии - межмодовая дисперсия, ведущий к уменьшению полосы пропускания волокна.

Различают *волоконную длину волны отсечки* (*λCF*) и *кабельную длину волны отсечки (λCCF).* Первая соответствует слабо напряженному волокну. На практике же волокно помещается в кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Кроме этого, сильные искривления волокон происходят при их укладке в сплайс-боксах. Все это ведет к подавлению побочных мод и смещению *λCCF* в сторону коротких длин волн по сравнению с *λCF*.

С практической точки зрения кабельная длина волны отсечки представляет больший интерес.

Волоконную длину волны отсечки можно оценить как теоретически, так и экспериментально. Теоретически легко это сделать для ступенчатого одномодового волокна – на основании выражений (7), (8) и (9) получаем

 (12)

*λCCF* в отличие от *λCF*, можно оценить только экспериментальным образом.

**Затухание**

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в во­локне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повтори­телями.

На затухание света в волокне влияют такие факторы, как: потери на поглощении; потери на рассеянии; кабельные потери.

Потери на поглощении и на рассеянии вместе называют *собственными потерями,* в то время как кабельные потери в силу их природы называют также *дополнительными потерями,* рисунок 4.

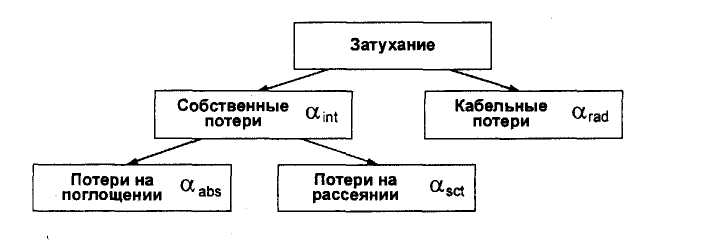


Рисунок 4 – Основные типы потерь в волокне

Полное затухание в волокне (измеряется в дБ/км) определяется в виде суммы



(13)

*Потери на поглощении αabs* состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла.

Собственные потери на поглощении растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощени­ем.

*Потери на рассеянии αsct*. Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. *Рэлеевское рассеяние* вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна. Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону *λ-4* и сильней проявляются в области коротких длин волн.

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между по­терями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

На рисунке 5 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм, и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для современных одномодовых и многомодовых волокон.

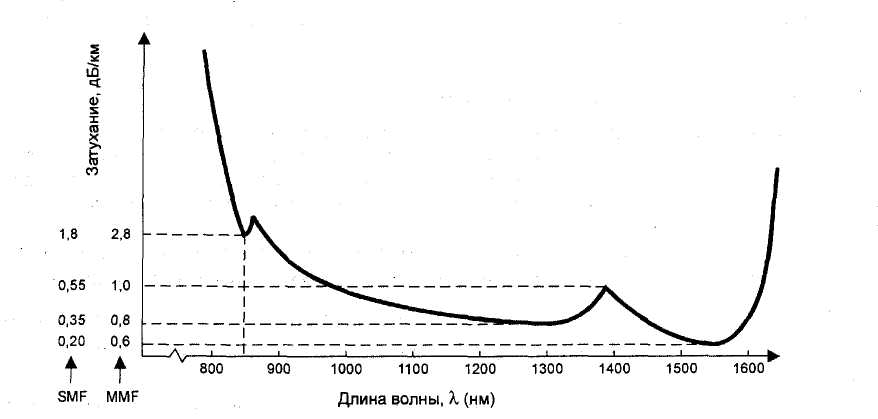


Рисунок 5 – Собственные потери в оптическом волокне [2]

*Кабельные (радиационные) потери αrad* обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производства кабеля, а так же в процессе инсталляции ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны радиационных потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные радиационные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

**Дисперсия и полоса пропускания**

По оптическому волокну передается не просто световая энергия, но также полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, в процессе распространения расплываются. При достаточно большом уши-рении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.

Дисперсия – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины *L* по формуле



(14)

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами, рассматриваемыми ниже:

• различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовой дисперсией *τмод*),

• направляющими свойствами световодной структуры (волноводной дисперсией *τw*),

• свойствами материала оптического волокна (материальной дисперсией *τmat*).

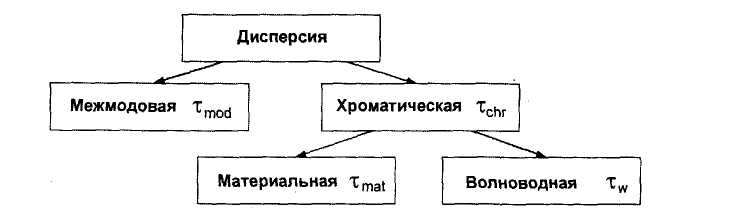
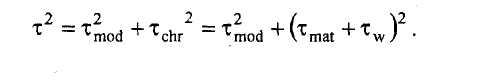


Рисунок 6 – Основные виды дисперсии

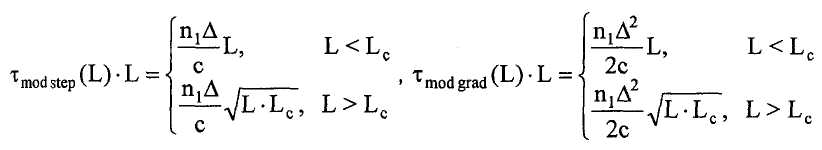
Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну. Результирующая дисперсия *τ* определяется из формулы

(15)



**Межмодовая дисперсия**

*Межмодовая дисперсия* возникает вследствие различной скорости распространения мод, и имеет место только в многомодовом волокне (рисунок 3 а, б). Для ступенчатого многомодового волокна и градиентного многомодового волокна с параболическим профилем показателя преломления ее можно вычислить соответственно по формулам



(16)

где *Lc* - длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5 км, для градиентного - порядка 10 км).

Изменение закона дисперсии с линейного на квадратичный связано с неоднородностями, которые есть в реальном волокне. Эти неоднородности приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. При *L > Lc* наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2 км и значительно меньше длины межмодовой связи. Поэтому можно пользоваться линейным законом дисперсии.

Вследствие квадратичной зависимости от *Δ* значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином *полоса пропускания.* При расчете полосы пропускания *W* можно воспользоваться формулой

(17)

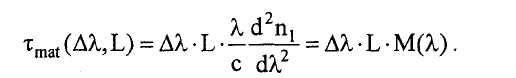


Измеряется полоса пропускания в МГц·км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл *W* - это максимальная частота (частота модуляции) передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с ростом рас­тояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

**Хроматическая дисперсия**

*Хроматическая дисперсия* состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

*Материальная дисперсия* обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциаль­ная зависимость показателя преломления от длины волны:



(18)

*Волноводная дисперсия* обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны

(19)



где введены коэффициенты *М(λ)* и *N(λ)* – удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно, а *Δλ*, (нм) – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как *D(λ) = М(λ) + N(λ)*. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм·км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация *М(λ)* и *В(λ)*, а результирующая дис персия *D(λ)* обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется *длиной волны нулевой дисперсии λ0*. Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пре­делах которых может варьироваться *λ0* для данного конкретного волокна.

Фирма Corning использует следующий метод определения удельной хроматической дисперсии. Измеряются задержки по времени при распространении коротких импульсов све­та в волокне длиной" не меньше 1 км. После получения выборки данных для нескольких длин волн из диапазона интерполяции (800-1600 нм для MMF, 1200-1600 нм для SF и DSF) делает­ся повторная выборка измерения задержек на тех же длинах волн, но только на коротком эта­лонном волокне (длина 2 м). Времена задержек, полученных на нем, вычитаются из соответ­ствующих времен, полученных на длинном волокне.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного волокна используется эмпирическая формула Селмейера: *τ(λ) = А + Вλ2 + С λ-2*. Коэффициенты *А*, *В*, *С* являются подгоночными, и выбираются так, чтобы экспериментальные точки лучше ложились на кривую *τ(λ)*, рисунок 7. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:



(20)

где *λ0 = (С/В)1/4* – длина волны нулевой дисперсии, новый параметр *So=8В* – наклон нулевой дисперсии (paзмepность пс/(нм2·км)), а λ – рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

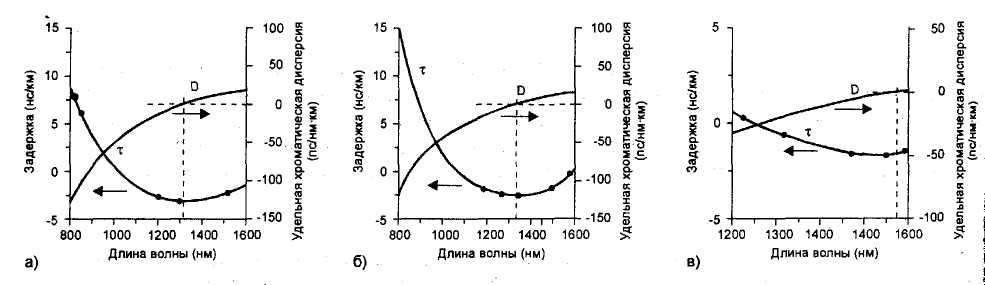


Рисунок 7 – Кривые временных задержек и удельных хроматических дисперсий для: а) многомодового градиентного волокна (62,5/125);

б) одномодового ступенчатого волокна (SF);

в) одномодового волокна со смещенной дисперсией (DSF)

**Поляризационная модовая дисперсия**

Поляризационная модовая дисперсия *τpmd* – возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды. Коэффициент удельной дисперсии *Т* нормируется в расчете на 1 км и имеет размерность (*пс*/), a *τpmd* растет с ростом расстояния по закону . Для учета вклада в результирующую дисперсию следует добавить слагаемое  в правую часть (15). Из-за небольшой величины *τpmd* может проявляться исключительно в одномодовом волокне, причем когда используется передача широкополосного сигнала (полоса пропускания 2,4 Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной полосой излучения 0,1 нм и меньше. В этом случае хроматическая дисперсия становится сравнимой с поляризационной модовой дисперсией.

В одномодовом волокне в действительности может распространяться не одна мода, а две фундаментальные моды – две перпендикулярные поляризации исходного сигнала. В идеальном волокне, в котором отсутствуют неоднородности по геометрии, две моды распространялись бы с одной и той же скоростью, рисунок 8 а. Однако на практике волокна имеют не идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных составляющих мод, рисунок 8 б.

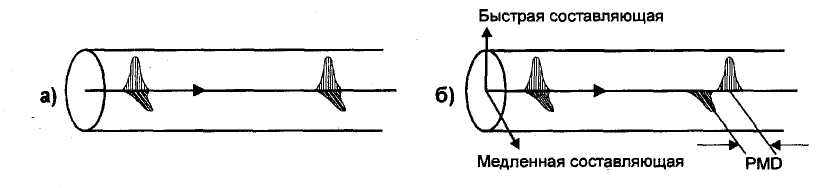


Рисунок 8 – Появление поляризационной модовой дисперсии.

Избыточный уровень *τpmd*, проявляясь вместе с чирпированным модулированным сигналом от лазера, а также поляризационной зависимостью потерь, может приводить к временным колебаниям амплитуды аналогового видеосигнала. В результате ухудшается качество изображения, или появляются диагональные полосы на телевизионном экране. При передаче цифрового сигнала высокой полосы (>2,4 Гбит/с) из-за наличия *τpmd* может возрастать битовая скорость появления ошибок.

Главной причиной возникновения поляризационной модовой дисперсии является нециркулярность (овальность) профиля сердцевины одномодового волокна, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. При изготовлении волокна только строгий контроль позволяет достичь низких значений этого параметра.

**2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА SM - 9/125 ФИРМЫ LUCENT TECHNOLOGIES**

**2.1 Расчет геометрических параметров оптоволокна**

Числовую апертуру волокна рассчитаем по формуле (5). Подставив значения *n1=1,466*, *Δ=0,33 %*, получим:



Далее из выражения (7) найдем нормированную частоту для окна прозрачности *λ=1310* нм:



Таким образом, на длине волны 1310 нм (в соответствии с соотношением (8)) в волокне может существовать многомодовый режим, но, как уже говорилось выше, неосновные моды быстрее затухают и при помещении волокна в кабель, который при прокладке будет испытывать изгибы, неосновные моды вырождаются и в волокне будет одномодовый режим.

**2.2 Определение длины волны отсечки**

Как уже говорилось выше, различают волоконную и кабельную длину волны отсечки. Кабельная определяется экспериментально. Рассчитаем волоконную длину волны отсечки из выражения (12).

нм

Учитывая, что кабельная длина волны отсечки смещена относительно волоконной в сторону более коротких длин волн, это еще раз подтверждает, что на длине волны 1310 нм в волокне, помещенном в кабель будет одномодовый режим.

**2.3 Определение затухания в оптоволокне**

Как уже писалось выше затухание в волокне складывается из собственных и кабельных потерь. Собственные потери определим из графика на рисунке 5.

 дБ/км

Тогда кабельные потери можно определить, как

 дБ/км

Общее затухание в волокне составит

 дБ/км

Как видно из графика (рисунок 5) наименьшего значения этого показателя можно добиться при работе на длине волны 1550 нм.

**2.4 Определение дисперсии и полосы пропускания волокна**

Для одномодового режима модовая составляющая дисперсии обращается в *0*. Кроме того, как видно из рисунка 7 б, хроматическая дисперсия в окне прозрачности 1310 нм тоже равна *0*. Таким образом, в этом режиме в волокне будет присутствовать только поляризационная модовая дисперсия. Исходя из технических характеристик оптоволокна коэффициент поляризационной модовой дисперсии составляет *Т=0,2* пс/√км. Тогда при расчете на *L*=100 км длины волокна, получим

пс

Далее из выражения (17) найдем полосу пропускания оптоволокна с расчетом на длину 100 км

 Гц

С учетом того, что по техническим характеристикам оптоволокна коэффициент поляризационной модовой дисперсии не превышает значения 0,2 пс/√км, величина *W=220* ГГц является минимальной полосой пропускания на расстоянии 100 км.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В курсовом проекте был произведен расчет основных параметров оптического волокна SM - 9/125 фирмы Lucent Technologies для окна прозрачности 1310 нм и регенерационного участка 100 км.

На основании расчетов очевидно, что с точки зрения затухания, для одномодовых волокон является оптимальным режим распространения в окне 1550 нм.

Проведенные расчеты показали, что на длине волны 1310 нм дисперсия является наименьшей (ввиду нулевой хроматической дисперсии и отсутствия модовой дисперсии), что и определило его использование в магистральных линиях связи.

Кроме того, из расчетов видно, что в окне прозрачности 1310 нм в одномодовом волокне может существовать многомодовый режим, но с учетом помещения волокна в кабель, который при прокладке неизбежно претерпевает изгибы, неосновные моды вырождаются, и устанавливается одномодовый режим.

К вышесказанному еще можно добавить что в качестве основного стандарта оптических волокон для наземных магистральных линий связи компанией ОАО «Ростелеком» был выбран стандарт ITU-T G.652, то есть одномодовые оптические волокна в окне прозрачности 1310 нм. [3]