



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ ИМЕНИ
ГУМАРБЕКА
ДАУКЕЕВА**

Кафедра
телекоммуникаций и
инновационных технологий

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

Сборник задач
для студентов образовательной программы 6В06201 – Радиотехника,
электроника и телекоммуникации

Алматы 2022

СОСТАВИТЕЛЬ: Киргизбаева А.У. Оптические системы связи в телекоммуникациях. Сборник задач (для студентов образовательной программы 6В06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации). – Алматы: АУЭС им. Г. Даукеева, 2022 г. – 32 с.

Тематика сборника задач включает понятия об основных характеристиках среды передачи и приемно-передающего модуля. Даны основные формулы для расчета и методика выполнения. Методические указания предназначены для студентов образовательной программы 6В06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации.

Ил. 5, табл. 7, библиогр. – 16 назв.

Рецензент: магистр, ст. преподаватель каф. «АУ» Л.Н. Рудакова

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинского университета энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева» на 2022 год.

©НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» 2022 г.

Введение

Под ВОСП понимают совокупность активных и пассивных устройств, предназначенных для передачи сообщений на расстояния по оптическим волокнам ОВ с помощью оптических волн и сигналов. Другими словами ВОСП – это совокупность оптических устройств и оптических линий передачи, обеспечивающая формирование, обработку и передачу оптических сигналов.

Физической средой распространения оптических сигналов являются волоконно-оптические или просто оптические кабели и создаваемые на их основе волоконно-оптические линии связи ВОЛС. Без широкого использования ВОЛС невозможно развитие телекоммуникационных технологий в области телефонной и телеграфной связи, кабельного телевидения и факсимильной связи, передачи данных, создание единой цифровой сети с интеграцией служб ISDN, внедрение на телекоммуникационных сетях технологий асинхронного способа передачи АТМ и построение транспортных сетей на основе синхронной цифровой иерархии SDH.

Диапазоны длин волн, в пределах которых обеспечиваются наилучшие условия распространения световых волн по оптическому волокну, называются его окнами прозрачности. В настоящее время для построения ВОСП используются длины волн от 0,8 мкм до 1,65 мкм. В дальнейшем предполагается освоение и более длинных волн – 2,4 и 2,6 мкм, называемых инфракрасным излучением или оптическим излучением.

Развитие ВОСП будет происходить в двух основных направлениях.

Первое – разработка и внедрение в сетях различного назначения новых волоконно-оптических технологий, направленных на повышение эффективности ВОСП. На линиях дальней связи основное внимание будет уделяться повышению скорости передачи информации, увеличению длины регенерационных участков и повышению надежности.

Второе – это создание линий передачи, в которых используются нелинейные свойства ОВ, обеспечивающие соли тонный режим распространения. Солитон – это импульс, наиболее подходящий для передачи по ОВ, т.к. он распространяется на большие расстояния без изменения формы и длительности. Тогда длины регенерационных участков могут достигать 1000 км.

1 Основы теории передачи электромагнитной энергии по оптическому волокну

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, называемым «оптическое волокно».

Волоконно-оптическая сеть – это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю.

Простейший световод представляет собой круглый диэлектрический стержень, называемый *сердцевинной*, окруженный диэлектрической *оболочкой*.

Показатель преломления материала сердцевинной оболочки $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, а $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$,

где ε_1 и ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость.

Показатель преломления оболочки обычно постоянен, а сердцевинной (в общем случае) является функцией поперечной координаты. Эту функцию называют *профилем показателя преломления*.

Если сердцевина световода имеет постоянное по радиусу значение показателя преломления, то такие световоды называются *световодами со ступенчатым профилем показателя преломления* (см. рисунок 1, а) (есть ступенька n на границе сердцевина-оболочка).

Если показатель преломления от центра к краю изменяется не ступенчато, а плавно, то такие световоды называются *световодами с градиентным профилем показателя преломления*, или *градиентными световодами* (см. рисунок 1, б).

Наибольшее распространение получили градиентные световоды с параболическим профилем показателя преломления:

$$n(r) = \sqrt{n_1 \cdot [1 - 2\Delta \cdot (2r/d)^2]}, \quad (1)$$

где n_1 – показатель преломления в центре сердцевинной ($\approx 1,5$);

r – текущий радиус;

d – диаметр сердцевинной.

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = 0,003 \dots 0,01. \quad (2)$$

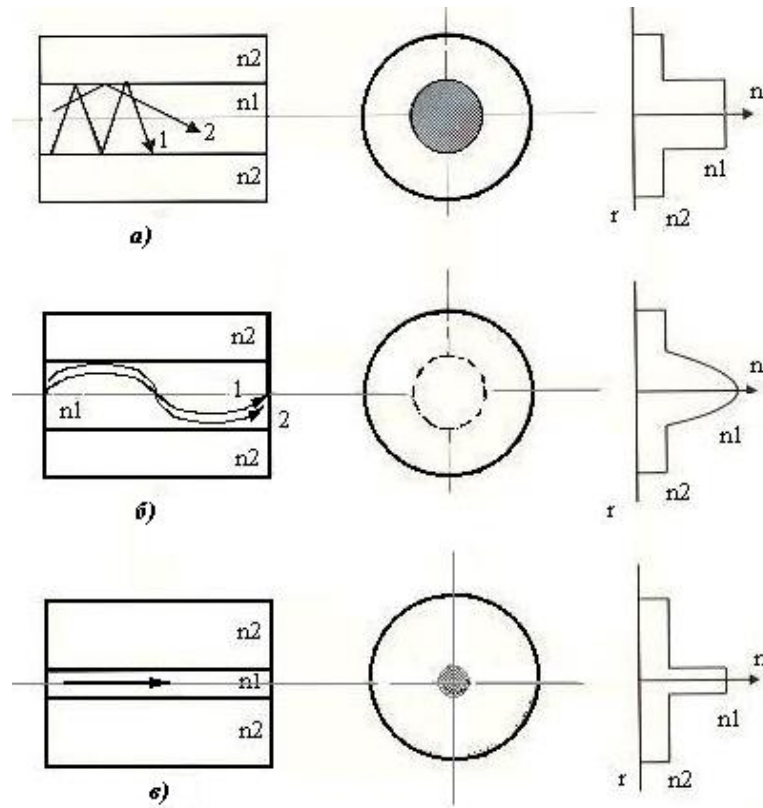


Рисунок 1 – Ход лучей в ступенчатом (а), градиентном (б) и одноподовом (в) оптическом волокне

Для передачи электромагнитной энергии по световоду используется известное явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектрических сред. Лучи распространяются в оптически более плотной среде, окруженной менее плотной, поэтому необходимо $n_1 > n_2$.

Если угол падения меньше некоторого критического угла, который определяется соотношением

$$\sin \Theta_{кр} = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}, \quad (3)$$

то луч полностью отражается на границе «сердцевина–оболочка» и остается внутри сердцевины. Этот угол соответствует углу полного внутреннего отражения $\varphi_{п.}$

Режим полного внутреннего отражения зависит от диаграммы направленности источника излучения. Величину $\Theta_{кр}$ называют *апертурным углом*.

Апертурой называется максимальный угол между оптической осью и световым лучом, падающим на торец многомодового волоконного световода, при этом выполняются условия полного внутреннего отражения. Величина апертурного угла зависит от абсолютного значения показателя преломления сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки. Световод пропускает лишь лучи, заключенные в конусе с углом $\Theta_{кр}$, соответствующим $\varphi_{п}$ – углу полного внутреннего отражения.

Наряду с понятием апертура принято использовать также понятие *числовая апертура* (от англ. *Numerical Aperture*):

$$NA = n_0 \sin \Theta_{кр} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4)$$

где n_0 – показатель преломления наружной среды (равен 1, если торец световода граничит с воздухом).

Число мод в световоде связано с числовой апертурой следующими простыми соотношениями:

для ступенчатого световода

$$N_{mod} = 2 \cdot \left[\pi \cdot NA \cdot \frac{a}{\lambda} \right]^2; \quad (5)$$

для градиентного световода

$$N_{mod} = \left[\pi \cdot NA \cdot \frac{a}{\lambda} \right]^2, \quad (6)$$

где a – радиус сердцевины волокна;

λ – длина волны.

2 Критическая частота и длина волны волоконного световода

При передаче электромагнитной энергии по волокну основная ее часть распространяется внутри сердцевины, часть же проникает в оболочку, где экспоненциально затухает. Степень уменьшения напряженности поля определяется волновым числом оболочки g_2 . При больших значениях

волнового числа (высоких частотах) поле концентрируется внутри сердцевинны. С уменьшением g_2 поле перераспределяется в пространстве вне сердцевинны и при $g_2=0$ выходит из волокна (излучается). Частота, при которой это происходит, называется *частотой отсечки*, или *критической частотой*. Критическая частота определяется при $g_2=0$ и имеет вид:

$$f_{кр} = \frac{V \cdot c}{2\pi a \cdot NA}, \quad (7)$$

где V – нормированная (характеристическая) частота волокна.

Характеристическая частота представляет собой обобщенный параметр, включающий диаметр сердцевинны, длину волны и коэффициенты преломления сердцевинны и оболочки:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA. \quad (8)$$

Таким образом, каждая мода имеет характеристическую частоту, которая *определяет ее область существования*. Тип мод определяется также параметром $V = P_{mn}$ (n характеризует число изменений поля по периметру световода, а m – по диаметру).

В таблице 1 приведены значения V для некоторых типов волн.

Таблица 1 – Типы волн в оптическом волокне

n	Значение $V=P_{mn}$, при m , равном			Тип волны
	1	2	3	
0	2,405	5,520	8,654	E_{0m}, H_{0m}
1	0,000	3,832	7,016	HE_{nm}
1	3,832	7,016	10,173	EH_{nm}

Из таблицы 1 видно, что только одна несимметричная мода HE_{11} имеет $V=0$, а следовательно, эта волна не имеет критической частоты и может распространяться при любой частоте и диаметре сердцевинны.

Выбирая параметры световода (λ, d, n_1, n_2) таким образом, чтобы следующие высшие моды с более высокими частотами отсечки не могли распространяться, можно получить режим распространения только одной (основной) моды HE_{11} .

Таким образом, при $0 < V < 2,405$ наблюдается одномодовый режим распространения.

Рабочая частота и диаметр сердцевины световода при одномодовом режиме выбираются из условий:

$$f_0 \geq \frac{P_{\text{зм}} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}; \quad (9)$$

$$d \leq \frac{2,405 \lambda_0}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}. \quad (10)$$

Практически одномодовый режим достигается при применении волокон с $d \approx \lambda$. Для увеличения d надо стремиться к уменьшению разницы между показателями преломления сердцевины и оболочки ($n_1 \approx n_2$).

Решение задач

№ 1. Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01-4 при $n_2=1.490$, $\Delta=0.01$. На сколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины $0B$ в пределах нормы?

Решение.

Определим конструктивные параметры оптического волокна, используемого в данном кабеле. В кабеле типа ОКК-50-01-4 используется градиентное оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 ± 3 мкм и диаметром сердцевины = 50 ± 3 мкм. Передача сигналов осуществляется на длине волны $\lambda=1,3$ мкм.

Вначале определим значение коэффициента преломления n_1 . Для этого воспользуемся формулой (3):

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1 - 2\Delta}} = \sqrt{\frac{1,490^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505$$

Число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01-4, определим из формулы (6):

$$N_1 = \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \left(\frac{3,14 \cdot 25}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 328$$

Определим, на сколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевинки ОВ в пределах нормы. Диаметр сердцевинки может меняться в пределах 50 ± 3 мкм. Поэтому минимальное число мод будет равно:

$$N_2 = \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \left(\frac{3,14 \cdot (25 - 1,5)}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 290$$

Максимальное число мод будет равно:

$$N_3 = \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \left(\frac{3,14 \cdot (25 + 1,5)}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 368$$

Таким образом, число мод может меняться на 78.

Ответ: $N_1=328$ мод, $N_2=290$ мод, $N_3=368$ мод, $\Delta N=78$ мод.

№ 2. Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-10-01 при $n_1=1.510$, $\Delta=0.01$.

Решение.

В кабеле типа ОКК-50-01 используется градиентное оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки =125 мкм и диаметром сердцевинки =50 мкм. В кабеле типа ОКК-10-01 используется одномодовое оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки =125 мкм и диаметром сердцевинки =10 мкм. Передача сигналов осуществляется на длине волны $\lambda=1.3$ мкм.

Вначале определим значение коэффициента

преломления n_2 .
$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta} = \sqrt{1,510^2 - 2 \cdot 1,510^2 \cdot 0,01} = 1,495$$

Величину нормированной частоты оптического волокна кабеля типа ОКК-50-01 определим из формулы (8):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25}{1,3} \sqrt{1,510^2 - 1,495^2} = 25,64.$$

Определим величину нормированной частоты оптического волокна кабеля типа ОКК-10-01:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{1,3} \sqrt{1,510^2 - 1,495^2} = 5,13.$$

Таким образом, нормированная частота оптического волокна кабеля типа ОКК-10-01 меньше нормированной частоты оптического волокна кабеля типа ОКК-50-01 в 5 раз.

№ 3. Определить, на сколько отличается величина числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОМЗКГ-10-1. В обоих типах оптических волокон $\Delta=0.01$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1=1.505$, для ОВ в кабеле ОМЗКГ-10-1 $n_1=1.510$.

Решение.

Определим значение коэффициента преломления n_2 для ОВ оптического кабеля типа ОМЗКГ-10-1.

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta} = \sqrt{1,510^2 - 2 \cdot 1,510^2 \cdot 0,01} = 1,495.$$

Для ОВ оптического кабеля типа ОКК-50-01 значение коэффициента преломления n_2 также определим из формулы:

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta} = \sqrt{1,505^2 - 2 \cdot 1,505^2 \cdot 0,01} = 1,490.$$

Найдем значение числовой апертуры в ОВ оптического кабеля типа ОКК-50-01:

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} = 0,2120.$$

Значение числовой апертуры в ОВ оптического кабеля типа ОМЗКГ-10-1 будет равно:

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,510^2 - 1,495^2} = 0,2123.$$

Ответ: $\Delta NA=0,0003$.

№ 4. На сколько изменится критическая частота в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛ-01 при изменении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы? $n_2=1.49$, $\Delta=0.01$, тип волны HE_{12} .

Решение.

Величину параметра P_{nm} находим из таблицы 1.

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1-2\Delta}} = \sqrt{\frac{1,490^2}{1-2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Определим критическую частоту:

$$f_0 = \frac{P_{\text{нм}} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2}} = 2,03 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Определим, на сколько изменится критическая частота при изменении диаметра сердцевинки ОВ в пределах нормы. Диаметр сердцевинки может меняться в пределах $8,5 \pm 1$ мкм. Минимальное значение критической частоты будет равно:

$$f_0 = \frac{P_{\text{нм}} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot (8,5 + 1) \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2}} = 1,82 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Максимальное значение критической частоты будет равно:

$$f_0 = \frac{P_{\text{нм}} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot (8,5 - 1) \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2}} = 2,30 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Таким образом, значение критической частоты может меняться на $0,48 \cdot 10^{14}$ Гц.

№ 5. На сколько изменится критическая длина волны в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛ-01, если изменился передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается HE_{21} ? $n_1=1.504$, $\Delta=0.01$?

Решение.

Для решения используем найденные в 2-й задаче конструктивные параметры ОВ оптического кабеля типа ОКК-10-01. В кабеле типа ОКК-10-01 используется одномодовое оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 мкм и диаметром сердцевинки = 10 мкм.

Величины параметров $P_{\text{нм}}$ для двух типов волн находим из таблицы 1.

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta} = \sqrt{1,504^2 - 2 \cdot 1,504^2 \cdot 0,01} = 1,489.$$

Определим величину критической длины волны для типа волны E_{01} ;

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{\text{зм}} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 10}{2,405 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,84 \text{ мкм.}$$

Найдем величину критической длины волны для типа волны **HE₂₁**:

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{\text{зм}} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 10}{2,445 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,81 \text{ мкм.}$$

Следовательно, значение критической длины волны изменится на 0,03 мкм.

Ответ: $\Delta\lambda_0 = 0,03$ мкм.

3. Затухание сигнала и дисперсия в волоконных световодах

Затухание в световодных трактах характеризуется *собственными потерями* ($\alpha_{\text{соб}}$) и *дополнительными потерями*, обусловленными деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитной оболочки при изготовлении кабеля ($\alpha_{\text{доп}}$).

Собственные потери волоконных световодов состоят в первую очередь из потерь поглощения $\alpha_{\text{п}}$ и потерь рассеяния $\alpha_{\text{р}}$.

$$\alpha_{\text{соб}} = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}}. \quad (11)$$

Потери на поглощение существенно зависят от чистоты материала и при наличии посторонних примесей ($\alpha_{\text{пр}}$) могут быть значительными.

Затухание в результате *поглощения* $\alpha_{\text{п}}$, дБ/км связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала световода ($\text{tg } \delta$) и определяется по формуле

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \cdot \frac{\pi n_1 \cdot \text{tg } \delta}{\lambda}, \quad (12)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины;

λ – длина волны, мкм;

$\text{tg } \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь световода (для кварца составляет 10^{-10}).

Рассеяние обусловлено неоднородностями материала волоконного световода, размеры которых меньше длины волны, и тепловой флуктуацией показателя преломления. Потери на рассеяние, дБ/км, рассчитывают по формуле

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4}, \quad (7.3)$$

где K_p – коэффициент рассеяния (для кварца $(0,8 \dots 1,5)$ дБ/км·мкм⁴);
 λ – длина волны, мкм.

Окна прозрачности

Связь по волоконно-оптическим кабелям эффективна не на всех длинах волн, а только в определенных участках спектра, где достигаются минимальные потери. Области минимальных потерь получили название *окон прозрачности* (см. рисунок 2).

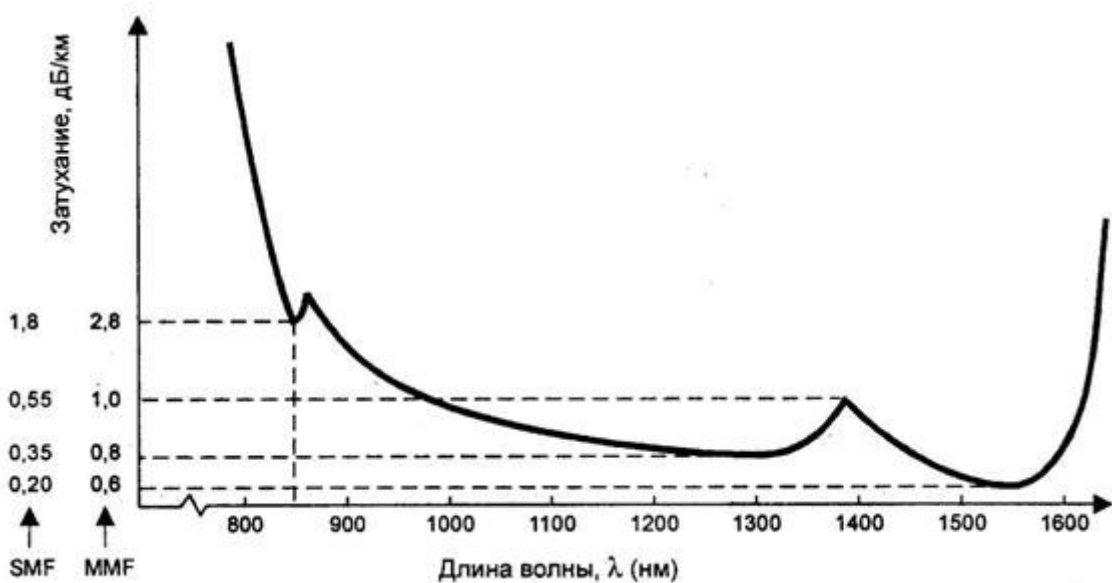


Рисунок 2 – Собственные потери в оптическом волокне

Для кварцевых световодов практический интерес представляют три окна прозрачности, перечисленные в таблице 2. Характеристики полупроводниковых излучателей и фотоприемников оптимизированы для работы в этих окнах.

Таблица 2 – Окна прозрачности

Окно прозрачности	Длина волны, мкм	Затухание, дБ/км
1	0,85	3...2
2	1,3	0,3...1
3	1,55	0,2...0,3

Из таблицы 2 видно, что переход из первого во второе окно прозрачности дает существенный выигрыш по величине затухания, тогда как работа в третьем окне большого выигрыша в величине потерь не приносит. С другой

стороны, по мере увеличения рабочей длины волны начинает быстро расти стоимость активных оптоэлектронных компонентов. Исходя из этих двух обстоятельств, в технике локальных сетей используют первое и второе окна прозрачности. Линии дальней связи работают в основном во втором и третьем окнах прозрачности, где, кроме низкого затухания, достигается также малая величина дисперсии.

Решение задач

№ 6. *Определить, на сколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а в первом, окне прозрачности. Параметры оптического волокна:*

$$n_2=1.490, \Delta=0.01, \text{tg}\delta = 10^{-11}.$$

Решение.

Предварительно определим значение коэффициента преломления n_1 .

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1-2\Delta}} = \sqrt{\frac{1,490^2}{1-2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Потери энергии на поглощение при работе на длине волны 1,55 мкм (третье окно прозрачности) определим из выражения:

$$\alpha_{\text{II}} = 8,69 \frac{\pi n_1 \text{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{1,55 \cdot 10^{-9}} = 0,26 \text{ дБ/км}.$$

Потери энергии на поглощение при работе на длине волны 0,85 мкм (первое окно прозрачности) будут равны, соответственно,

$$\alpha_{\text{II}} = 8,69 \frac{\pi n_1 \text{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{0,85 \cdot 10^{-9}} = 0,48 \text{ дБ/км}.$$

Потери энергии на рассеяние при работе в третьем окне прозрачности определим из выражения:

$$\alpha_{\text{P}} = \frac{K_{\text{P}}}{\lambda^4} = \frac{0,85}{1,55^4} = 0,14 \text{ дБ/км}.$$

Потери энергии на рассеяние при работе на длине волны 0,85 мкм (первое окно прозрачности) будут равны, соответственно,

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4} = \frac{0,85}{0,85^4} = 1,53 \text{ дБ/км.}$$

Собственные потери в третьем окне прозрачности находим из выражения:

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p = 0,26 + 0,14 = 0,4 \text{ дБ/км.}$$

Собственные потери в первом окне прозрачности будут равны, соответственно,

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p = 0,48 + 1,53 = 2,01 \text{ дБ/км.}$$

Следовательно, при изменении передачи сигналов из третьего окна прозрачности в первое собственные потери возрастут на 1,61 дБ/км.

4. Дисперсия и пропускная способность световодов

Наряду с затуханием α важнейшим параметром волоконно-оптических систем передачи является полоса частот ΔF , пропускаемая световодом. Она определяет объем информации, который можно передавать по оптическому кабелю (ОК). Ограничение ΔF применительно к цифровым системам передачи обусловлено тем, что импульс на приеме приходит размытым, искаженным вследствие различия скоростей распространения в световоде отдельных его частотных составляющих. Данное явление носит название *дисперсии*.

Дисперсия (уширение импульсов) – рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Импульсный сигнал на вход приемного устройства приходит тем искаженнее, чем длиннее линия. Дисперсия приводит к появлению межсимвольных помех и ограничению пропускной способности кабеля.

Величина дисперсии может быть рассчитана по формуле:

$$\tau(l) = \sqrt{(\tau_{\text{ВВХ}})^2 - (\tau_{\text{БХ}})^2} \quad (14)$$

Межмодовая дисперсия. В многомодовых оптических волокнах основной вклад в уширение импульса вносит межмодовая дисперсия.

Для ступенчатого оптического волокна:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta \cdot n_1 \cdot l}{c}, \quad \text{при } l < l_c,$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta \cdot n_1}{c} \sqrt{l \cdot l_c}, \text{ при } l > l_c, \quad (15)$$

где l_c – длина связи мод, для ступенчатого оптического волокна составляет 5...7 км.

Для градиентного оптического волокна:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1 l}{2c}, \text{ при } l < l_c,$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1}{2c} \sqrt{l \cdot l_c}, \text{ при } l > l_c \quad (16)$$

Длина связи мод градиентного световода 10...15 км.

Модовая дисперсия градиентных ОВ, как правило, на порядок ниже, чем у ступенчатых волокон.

В таблице 3 в качестве примера приведены значения модовой дисперсии $\tau_{\text{мод}}$ в ступенчатых и градиентных волокнах при различных длинах линии и различных соотношениях показателей преломления сердцевины и оболочки.

На практике расчет полосы пропускания многомодового волокна выполняют по формуле

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau}. \quad (17)$$

Полоса пропускания измеряется в МГц·км.

Таблица 3

Длина линии l , км	Значение $\tau_{\text{мод}}$, нс			
	ступенчатые ОВ		градиентные ОВ	
	Значение Δ			
	0.01	0.006	0.01	0.006
10	498	332	2.47	1.09
20	718	474	3.55	1.58
30	868	578	4.32	1.91

Хроматическая (частотная) дисперсия. Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Данная дисперсия вызвана наличием спектра частот у источника излучения, определяется его характером диаграммы направленности и некогерентностью.

Материальная дисперсия объясняется тем, что коэффициент преломления стекла изменяется с длиной волны $n=f(\lambda)$. Практически любой источник генерирует не на одной длине волны, а в определенном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$. В результате различные спектральные составляющие сигнала имеют различную скорость распространения, что приводит к различной задержке на выходе волокна. У лазерных источников спектр узкий, поэтому данная дисперсия незначительна.

В выражение для материальной дисперсии входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{\text{мат}} = \frac{\Delta\lambda \lambda^2}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} l, \quad (18)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии источника излучения;

λ – длина передаваемой волны;

c – скорость света;

l – длина линии.

Для идеального ступенчатого профиля

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot M(\lambda), \quad (19)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии источника излучения (для лазера 1...3 нм, для светодиода 20...40 нм);

$M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия, пс/(нм·км) – пикосекунд на нанометр ширины спектра и километр длины световода (см. таблицу 4)

Таблица 4

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

С увеличением длины волны значение материальной дисперсии уменьшается, затем проходит через ноль и приобретает отрицательное значение.

Волноводная (внутримодовая) дисперсия обусловлена процессами внутри моды. Она характеризует зависимость коэффициента распространения моды от длины волны $\gamma=\psi(\lambda)$ и зависит от ширины передаваемого спектра частот.

$$\tau_B = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{2n_1^2 \cdot \Delta \cdot l}{c} = \Delta\lambda \cdot l \cdot B(\lambda), \quad (20)$$

где $B(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия, (см. таблицу 5).

Таблица 5

Длина волны λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,55	1,6	1,8
$B(\lambda)$, пс/(км·нм)	5	5	6	7	8	8	12	14	16

Удельная хроматическая дисперсия является алгебраической суммой удельных материальной и волноводной дисперсий:

$$D(\lambda) = M(\lambda) + B(\lambda). \quad (21)$$

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией соотношением:

$$\tau_{xp}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad \text{с/км}, \quad (22)$$

где $D(\lambda)$ – удельная хроматическая дисперсия, с/(нм·км);
 $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника, нм.

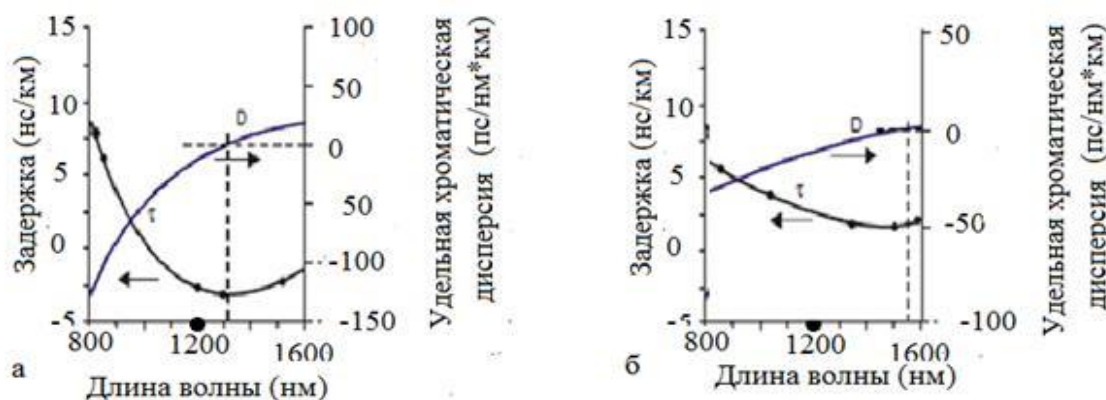


Рисунок 3 – Кривые временных задержек и удельных хроматических дисперсий:

- а) многомодового градиентного волокна, одномодового волокна;
 б) одномодового волокна со смещенной дисперсией

Профильная дисперсия. Данный вид дисперсии проявляется в реальных ОВ, которые могут быть регулярными (с регулярной, геликоидальной скруткой), нерегулярными (с нерегулярным изменением границы раздела профиля показателя преломления), неоднородными (наличие инородных частиц).

Величина уширения импульсов из-за профильной дисперсии в ООВ находится из выражения:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{n_1}{cn} \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} \left(\frac{\lambda}{4\Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} - \frac{m_1}{n_1} \right) \left[2(\Gamma - b) + v \cdot \frac{\partial^2 (bv)}{\partial v^2} \right] \cdot l, \quad (23)$$

где n – эффективный показатель преломления;
 b – нормированная постоянная распространения;
 m_1 – групповой показатель преломления сердцевины;
 Γ – коэффициент локализации по мощности;
 v – нормированная частота.

Упрощенная формула:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta \lambda \cdot l \cdot \Pi(\lambda), \quad (24)$$

где $\Pi(\lambda)$ – удельная профильная дисперсия, пс/(нм·км).

Таблица 6

Длина волны λ , мкм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,55	1,6	1,8
$\Pi(\lambda)$, пс/(км·нм)	0	1,5	5	2,5	4	5	5,5	6,5	7,5

Результирующее значение дисперсии:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{в}}) + \tau_{\text{проф}}]^2}. \quad (25)$$

Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими с этой точки зрения являются одномодовые световоды, где присутствует лишь хроматическая дисперсия, величина которой не превышает нескольких пикосекунд в определенном диапазоне длин волн ($\lambda=1,2 \dots 1,6$ мкм).

Из многомодовых световодов лучшие данные по дисперсии – у градиентных световодов с плавным параболическим законом изменения показателя преломления, в которых происходит выравнивание времени распространения различных мод и определяющей является материальная дисперсия. По абсолютной величине дисперсия уменьшается с ростом длины волны и колеблется в пределах 1...2 нс/км.

Таблица 7 – Дисперсия сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	λ , нм	Межмодовая дисперсия, пс/км τ_{mod}	Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км) $D(\lambda)$	Результирующая удельная полоса пропускания, МГц·км, $W = 0,44/\tau$ $/\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\Delta\lambda \cdot D(\lambda))^2 /$		
				$\Delta\lambda = 2$ нм	$\Delta\lambda = 4$ нм	$\Delta\lambda = 35$ нм
MMF 50/125	850	414 ¹⁾	99,6 ³⁾	958	766	<u>125</u>
	1310	414	1,0	1062	<u>1062</u>	<u>1050</u>
	1550	414	19,2	1058	1044	540
MMF 62,5/125	850	973 ²⁾	106,7 ⁴⁾	441	414	<u>114</u>
	1310	973	4,2	452	<u>452</u>	<u>450</u>
	1550	973	17,3	451	450	384
SF 8/125	1310	0	< 1,8 ⁵⁾	<u>> 120000</u>	<u>61000</u>	<u>6900</u>
	1550	0	17,5	<u>12600</u>	6300	720
DSF 8/125	1310	0	21,2 ⁶⁾	<u>10400</u>	5200	594
	1550	0	< 1,7	<u>> 120000</u>	<u>65000</u>	7400

Явление дисперсии приводит как к ограничению пропускной способности кабелей, так и к снижению дальности передачи по ним, так как чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса. Таким образом, полоса частот ΔF и дальность передачи l взаимосвязаны. Соотношение между ними выражается формулой

$$\frac{\Delta F}{\Delta F_x} = \sqrt{\frac{l_x}{l}}, \quad (26)$$

где значения с индексом x – искомые, а без индекса x – заданные.

Соответственно,

$$\Delta F_x = \Delta F \sqrt{\frac{l_x}{l}}, \quad l_x = l \left(\frac{\Delta F}{\Delta F_x} \right)^2. \quad (27)$$

На рисунке 4 показана зависимость дисперсии и пропускной способности от длины линии.

Для определения длины регенерационного участка строят график изменения ΔF_x от длины трассы ВОЛС l_x . На основании этого графика для требуемой системы передачи определяют длину регенерационного участка. Величина скорости передачи системы соответствует необходимой ширине полосы пропускания регенерационного участка. На рисунке 4 показан пример определения длины регенерационного участка третичной цифровой системы.

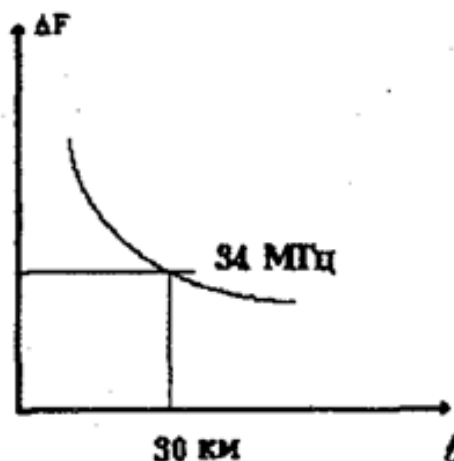


Рисунок 4 – Определение длины регенерационного участка

После нахождения длины регенерационного участка, лимитированного дисперсией, проводят ее сравнение с найденной ранее длиной регенерационного участка, лимитированного затуханием, и выбирают наименьшее значение.

Ограничение длины регенерационного участка затуханием.

При определении длины регенерационного участка, лимитированного затуханием, следует пользоваться выражением:

$$L = \frac{\mathcal{E} - C - A_a}{\alpha_x + \frac{\alpha_c}{l_{c.d.}}}, \text{ км}, \quad (28)$$

- где \mathcal{E} – энергетический потенциал системы передачи, дБ;
 C – энергетический запас системы, дБ;
 A_a – дополнительные потери в пассивных компонентах ВОЛС (на вводе/выводе), дБ;
 α_x – коэффициент затухания оптического кабеля, дБ/км;
 α_c – потери в неразъемном соединении, дБ;
 $l_{c.d.}$ – строительная длина оптического кабеля, км.

Энергетический потенциал системы передачи (\mathcal{E}) определяет максимально допустимое затухание оптического сигнала в оптическом кабеле, в разъёмных и неразъёмных соединениях на участке регенерации, а также другие потери в узлах аппаратуры.

Энергетический запас системы обычно составляет 6 дБ (6–10 дБ), он необходим для компенсации эффекта старения элементов аппаратуры и оптического кабеля, компенсации дополнительных потерь при ремонте оптического кабеля (потери на стыках кабельных вставок) и других отклонений параметров участка в процессе эксплуатации.

Дополнительные потери в пассивных компонентах ВОЛС (A_a) составляют порядка 3–5 дБ и возникают за счет разъёмных соединителей, устройств соединения линейного кабеля со станционным и т.д.

Решение задач

№ 7. На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей – ОК-50-2 и ОКК-50-01. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 9 км; $n_2=1.490$, $\Delta n=0,015$.

Решение.

Предварительно определим значение коэффициента преломления n_1 и относительное соотношение показателей преломления – Δ .

$$n_1 = n_2 + \Delta n = 1,490 + 0,015 = 1,505.$$

Определим относительное значение показателя преломления оптического волокна:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{1,505^2 - 1,490^2}{2 \cdot 1,505^2} = 0,01.$$

В оптических кабелях, выполненных на многомодовых волокнах, наибольший вклад в уширение импульсов вносит модовая дисперсия, поэтому в дальнейших расчетах будем учитывать только этот фактор.

Рассчитаем дисперсию в ОК-50-2. Из [2] находим, что в кабеле типа ОК-50-2 используется многомодовое ступенчатое оптическое волокно:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n}{c} \sqrt{L L_c} = \frac{0,01 \cdot 1,505}{3 \cdot 10^8} \cdot \sqrt{9 \cdot 5} = 0,336 \text{ мкс}$$

Рассчитаем дисперсию в ОКК-50-01. Из [2] находим, что в кабеле типа ОКК-50-01 используется градиентное оптическое волокно:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} \ell = \frac{0,01^2 \cdot 1,505}{2 \cdot 3 \cdot 10^5} \cdot 9 = 2,23 \text{ нс.}$$

Следовательно, уширение импульсов в ОКК-50-01 в 150,7 раза меньше, чем в кабеле ОК-50-2.

№ 8. Определить, во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОКЛ-01, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный (с $\lambda=0,85$ мкм). Длина ВОЛС равна 63 км.

Решение.

Так как ОКЛ-01 содержит одномодовые волокна [2], работающие на длине волны 1,55 мкм, то необходимо будет рассчитать хроматическую дисперсию.

Для расчетов материальной дисперсии используем упрощенную формулу. Дисперсия при работе лазерного источника излучения будет равна:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \ell M(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot (-18) = -1,134 \text{ мкс.}$$

Дисперсия при светодиодном источнике равна:

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \ell M(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 104 = 131,040 \text{ мкс.}$$

Волноводная дисперсия. При работе лазерного источника излучения будет равна:

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \ell V(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 12 = 0,765 \text{ мкс.}$$

Дисперсия при светодиодном источнике равна:

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \ell V(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 5 = 6,300 \text{ мкс.}$$

Профильная дисперсия. При работе лазерного источника излучения будет равна:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \ell P(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 5,5 = 0,346 \text{ мкс.}$$

Дисперсия при светодиодном источнике равна:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \ell \Pi(\lambda) = 2 \cdot 63 \cdot 0 = 0 \text{ мкс.}$$

Результирующее значение дисперсии при работе лазерного источника излучения:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мзм}} + \tau_{\text{ее}}) + \tau_{\text{ГП}}]^2} = \sqrt{0 + [(131,04 \cdot 10^{-6} + 6,30 \cdot 10^{-6}) + 0]^2} = 23 \text{ нс,}$$

Результирующее значение дисперсии при светодиодном источнике равно:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мзм}} + \tau_{\text{ее}}) + \tau_{\text{ГП}}]^2} = \sqrt{0 + [(-1,134 \cdot 10^{-6} + 0,765 \cdot 10^{-6}) + 0,346 \cdot 10^{-6}]^2} = 137,3 \text{ мкс,}$$

Следовательно, дисперсия сигнала возрастет в 5971 раз.

№ 9. *Определить длину регенерационного участка ВОЛС, лимитированную затуханием. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОКЛ-01-0,3, работающего в 3-м «окне прозрачности», с использованием аппаратуры "STM-4". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения потерь на неразъемных соединителях. Потери в разъемных соединителях – 1 дБ, в неразъемных соединителях – 0.1; 0.3; 0.5 дБ. Потери на вводе (выводе) – 2 дБ. Энергетический запас системы – 6 дБ.*

Решение.

В кабеле типа ОКЛ-01-0,3 используется одномодовое оптическое волокно с коэффициентом затухания 0,3 дБ/км, энергетический потенциал системы передачи "STM-4" $\Xi = 38$ дБ, строительная длина кабеля 2000 м.

Определим длину регенерационного участка ВОЛС при первом значении потерь в неразъемных соединителях:

$$L = \frac{\Xi - C - A_a}{\alpha_x + \frac{\alpha_c}{\ell_{с.д.}}} = \frac{38 - 6 - 2}{0,3 + \frac{0,1}{2}} = 85,7 \text{ км.}$$

При втором значении потерь в неразъемных соединителях длина регенерационного участка ВОЛС равна:

$$L = \frac{\Xi - C - A_a}{\alpha_x + \frac{\alpha_c}{\ell_{с.д.}}} = \frac{38 - 6 - 2}{0,3 + \frac{0,3}{2}} = 66,7 \text{ км.}$$

При третьем значении потерь в неразъемных соединителях длина регенерационного участка ВОЛС равна:

$$L = \frac{\Xi - C - A_a}{\alpha_x + \frac{\alpha_c}{l_{c.д.}}} = \frac{38 - 6 - 2}{0,3 + \frac{0,5}{2}} = 54,5 \text{ км.}$$

Следовательно, при увеличении потерь в неразъемных соединителях от 0.1 до 0.5 дБ длина регенерационного участка снижается на 31,2 км.

№ 10. Определить длину регенерационного участка ВОЛС, лимитированную дисперсией. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОКК-50-01, с использованием аппаратуры "STM-1". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения ширины полосы пропускания оптической волокну. Ширина полосы пропускания оптического волокна, используемого в кабеле, 800 МГц·км и 500 МГц·км.

Решение.

В кабеле типа ОКК-50-01 используется градиентное оптическое волокно, а скорость передачи аппаратуры "STM-1" равна 34 Мбит/с. Для решения этой задачи необходимо построить график изменения ширины полосы пропускания рассматриваемой ВОЛС от длины трассы.

Рассчитаем изменение ширины полосы пропускания рассматриваемой ВОЛС от длины трассы. Расчеты проводятся по каждому 10 км трассы: 10 км – 60 км. Так как длина установившегося режима передачи для градиентного волокна равна 10 км, то для расчетов используем формулу (43). Расчетные данные для ВОЛС, построенной на основе ОВ с шириной полосы пропускания 800 МГц·км, будут равны:

$$\Delta F_{10} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{10 \cdot 10}} = 80,0 \text{ МГц,}$$

$$\Delta F_{20} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{20 \cdot 10}} = 56,6 \text{ МГц,}$$

$$\Delta F_{30} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{30 \cdot 10}} = 46,2 \text{ МГц,}$$

$$\Delta F_{40} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{40 \cdot 10}} = 40,0 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{50} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{50 \cdot 10}} = 35,8 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{60} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{800}{\sqrt{60 \cdot 10}} = 32,7 \text{ МГц}.$$

Расчетные данные для ВОЛС, построенной на основе 0В с шириной полосы пропускания 500 МГц-км, будут равны:

$$\Delta F_{10} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{10 \cdot 10}} = 50,0 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{20} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{20 \cdot 10}} = 35,4 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{30} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{30 \cdot 10}} = 28,9 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{40} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{40 \cdot 10}} = 25,0 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{50} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{50 \cdot 10}} = 22,4 \text{ МГц};$$

$$\Delta F_{60} = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x l_c}} = \frac{500}{\sqrt{60 \cdot 10}} = 20,4 \text{ МГц}.$$

Построим графики изменения ширины полосы пропускания рассматриваемой ВОЛС от длины трассы.

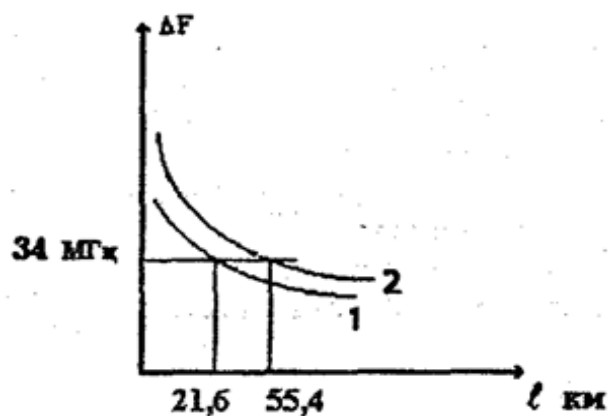


Рисунок 5 – Графики изменения ширины полосы пропускания рассматриваемой ВОЛС от длины трассы

На рисунке 5 первая кривая соответствует варианту ВОЛС, построенной на основе ОВ с шириной полосы пропускания 500 МГц-км, а вторая кривая, соответственно, ОВ с шириной полосы пропускания 800 МГц-км.

Из рисунка 5 видно, что при работе аппаратуры «STM-1» длина регенерационного участка в первом случае будет равна 21,6 км, а во втором случае – 55,4 км.

Таким образом, длина регенерационного участка снизится на 33,8 км.
Ответ: $\Delta L_{\text{рег}}=33,8$ км.

Задачи для самостоятельного решения

К разделу "Расчет основных параметров оптических кабелей"

1. Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОК-50-2-5-4 при $n_2=1.5$, $\Delta=0.012$. На сколько изменится число мод при увеличении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы?

2. Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКЛБ-01-0,3 при $n_1=1.5$, $\Delta=0.011$.

3. Определить, на сколько отличается величина числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКЛБ-01-0,3. В обоих типах оптических волокон $\Delta=0.011$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1=1.503$, для ОВ в кабеле ОКЛБ-01-0,3 $n_1=1.508$.

4. Рассчитать числовую апертуру волокна и построить график зависимости числовой апертуры от показателя преломления n_2 , если $n_1=1.5$, $n_2=1,46 \div 1,3$.

5. На сколько изменится критическая частота в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛС-01 при увеличении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы? $n_2=1.48$, $\Delta=0.01$, тип волны HE_{21} .

6. На сколько изменится критическая частота волны в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛС-01, если изменился передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается EH_{11} ? $n_1=1.5$, $\Delta=0.011$.

К разделу "Расчет затухания в оптических кабелях"

7. Определить, на сколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а во втором окне прозрачности. Параметры оптического волокна: $n_2=1.495$, $\Delta=0.011$, $\text{tg}\delta=10^{-11}$.

8. Определить, какое дополнительное затухание следует ожидать в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛС-01, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 1,8 мкм, 2,3 мкм и 2,9 мкм.

9. Определить потери на поглощение, потери на рассеивание, коэффициент затухания оптического волокна. Построить график зависимости коэффициента затухания от длины волны. Кабель ОКК-50-01, $n_1=1.48$, $\lambda=0,85\div 1,62$ мкм.

10. Определить, какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОК-50-2-3-8 возникли дополнительные микроизгибы. Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta = 0,005$, $N_H = 200$, $y_H = 0,0025$ мм, $E_o = 6,9 \cdot 10^8$ Н/м², $E_c = 6,2 \cdot 10^{10}$ Н/м².

11. При сращивании строительных длин оптического кабеля ОК-50-2-3-8 в одном из волокон произошло радиальное смещение торцов на 5 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери.

12. При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу к линейному оптическому кабелю ОК-50-2-3-8 произошло угловое смещение торцов волокна на 8°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta=0.009$; $n_1=1.5$.

13. С течением времени в разъёмном соединителе стационарного оптического кабеля ОКС-50-01 произошло осевое смещение торцов одного оптического волокна на 15 мкм и угловое смещение торцов волокна на 11°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta=0.009$; $n_2=1.49$.

К разделу "Расчет дисперсии в оптических кабелях"

14. На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей: ОК-50-1 и ОКК-50-02. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 11 км; $n_2=1.492$, $\Delta n=0,01$.

15. Определить, во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОМЗКГ, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный (с $\lambda=0,87$ мкм). Длина ВОЛС равна 48 км.

16. Рассчитать уширение импульсов в многомодовом ступенчатом ОВ и построить график зависимости дисперсии от длины линии. Кабель ОК-50-1, $n_1=1.5$, $n_2=1.492$, длина линии 50 км.

17. Рассчитать удельное уширение импульсов в одномодовом ОВ. Кабель ОКЛС-01, $\Delta\lambda=1$ нм, $\lambda=1,3$ мкм, $L=100$ км. Для расчета воспользоваться таблицей 4 и 5.

К разделу "Расчет длины регенерационного участка"

18. Определить длину регенерационного участка ВОЛС, лимитированную затуханием. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОМЗКГ-10, работающего в 3-м "окне прозрачности", с использованием аппаратуры "STM-16". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения потерь на неразъемных соединителях. Потери в разъемных соединителях – 1,5 дБ, в неразъемных соединителях – 0.2; 0.4; 0.6 дБ. Потери на вводе (выводе) – 1,5 дБ. Энергетический запас системы – 5 дБ.

19. Определить длину регенерационного участка ВОЛС, ограниченную дисперсией. ВОЛС построена на основе кабеля типа ОМЗКГ-10, с использованием аппаратуры "STM-1". Оценить зависимость длины усилительного участка от изменения ширины полосы пропускания оптического волокна. Ширина полосы пропускания оптического волокна, используемого в кабеле: 700 МГц-км и 400 МГц-км.

20. Рассчитать коэффициент широкополосности многомодового ступенчатого оптического волокна. Построить амплитудно-частотную модуляционную характеристику ОК для заданной длины регенерационного участка. Длина регенерационного участка равна 30÷40 км, длина трассы – 100 км, дисперсия – 23,5 нс.

21. Рассчитать коэффициент широкополосности многомодового градиентного оптического волокна. Построить амплитудно-частотную модуляционную характеристику ОК для заданной длины регенерационного участка. Длина регенерационного участка равна 20÷50 км, длина трассы – 100 км, дисперсия – 1,7 нс.

Список литературы

1. Портнов Э.Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. – М., 2012.
2. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – СПб.: «Лань», 2014.
3. Оптические системы связи в телекоммуникациях. Конспект лекций. Киргизбаева А.У. – Алматы АУЭС, 2022. (каз. / рус.).
4. Фокин В.Г. Современные оптические системы передачи информации. – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ СибГУТИ, 2012.
5. Лапина Н.Ф., Татаркина О.А. Волоконно-оптические системы передачи. – Екатеринбург: Изд-во УрТИСИ ГОУ ВПО "СибГУТИ", 2014.
6. Елизарова Е.Ю., Агатаева Б.Б. Оптические системы связи в телекоммуникациях. Сборник задач. – Алматы: АУЭС, 2012 г.

Содержание

Введение	3
1 Основы теории передачи электромагнитной энергии по оптическому волокну	4
2 Критическая частота и длина волны волоконного световода	6
3 Затухание сигнала и дисперсия в волоконных световодах	12
4 Дисперсия и пропускная способность световодов	15
Список литературы	30

Киргизбаева Айнура Уалиевна

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ

Сборник задач
для студентов образовательной программы
6B06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Редактор: Жанабаева Е.Б.
Специалист по стандартизации: Ануарбек Ж.А.

Подписано в печать
Тираж 50 экз.
Объем 2,0 уч.-изд. л.

Формат 60×84 1/16.
Бумага типографская № 1.
Заказ № Цена 1000 тенге.

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013 Алматы, Байтурсынова, 126/1