

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6-Р

Решение задач

Оптические кабели связи

1. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ и ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Показатель преломления среды:

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость среды распространения сигнала;

ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Относительное значение показателя преломления оптического волокна:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (2)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины оптического волокна;

n_2 – показатель преломления оболочки оптического волокна.

Показатель преломления градиентного оптического волокна:

$$n_r = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где n_0 – показатель преломления в центре сердцевины;

r – текущий радиус, мкм;

a – радиус сердцевины волокна, мкм.

Числовая апертура (ЧА) волокна – это синус максимального угла падения луча по отношению к оси **волокна**, при котором свет входит в сердцевину и далее распространяется по **волокну**. ЧА определяется как разница показателей преломления сердцевины и оболочки, которое может быть определено также из условия, что луч вводится в **волокно** под углом полного внутреннего отражения.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4)$$

Нормированная частота – один из важнейших обобщающих параметров ОВ, связывает структурные параметры и длину волны излучения, распространяемого в волокне, используется для расчета критической частоты:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

a – радиус сердцевины волокна, мкм;

λ – длина волны, мкм.

Число распространяемых мод:

$$N = \frac{V^2}{2\left(1 + \frac{2}{n}\right)}, \quad (6)$$

где n – показатель степени изменения профиля показателя преломления (для ступенчатого волокна $n = \infty$, а для градиентного волокна $n = 2$).

Потери энергии на поглощение:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda}, \text{ дБ/км}, \quad (7)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины ОВ;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала сердцевины ОВ;

λ – длина волны, км.

Потери на рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4}, \text{ дБ/км}, \quad (8)$$

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

λ – длина волны, мкм.

Величина уширения импульсов в оптическом волокне:

$$\tau_{\text{и}} = \sqrt{\tau_{\text{ввых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{вх}}$ – ширина импульса на входе;

$\tau_{\text{ввых}}$ – ширина импульса на выходе (значения берутся на уровне половины амплитуды импульсов).

Модовая дисперсия свойственна только многомодовым волокнам и обусловлена отличием времени прохождения мод по ОВ от его входа до выхода. Следует отдельно рассматривать процесс возникновения **модовой дисперсии** в ступенчатых и градиентных волокнах.

Модовая дисперсия в многомодовых волокнах со ступенчатым профилем показателя преломления:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n_1}{c} l, \text{ при } l \leq l_c, \quad (10)$$

и

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n_1}{c} \sqrt{l \cdot l_c}, \text{ при } l \geq l_c, \quad (11)$$

где

Δ – относительное соотношение показателей преломления;

n_1 – показатель преломления сердцевины;

c – скорость света ($c=3 \cdot 10^5 \text{ км/с}$);

l – длина оптического волокна;

l_c – длина связи мод (5-7 км для ступенчатого многомодового волокна).

Модовая дисперсия в градиентных волокнах:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} l, \text{ при } l \leq l_c, \quad (12)$$

и

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} \sqrt{l \cdot l_c}, \text{ при } l \geq l_c, \quad (13)$$

где

Δ – относительное соотношение показателей преломления;

n_1 – показатель преломления сердцевины;

c – скорость света ($c=3 \cdot 10^5 \text{ км/с}$);

l – длина оптического волокна;

l_c – длина связи мод (10 -15 км для градиентных ОВ).

Дисперсия волн — в теории волн различие фазовых скоростей линейных волн в зависимости от их длины. Дисперсия волн приводит к тому, что волновое возмущение произвольной негармонической формы претерпевает изменения (диспергирует) по мере его распространения. Дисперсия приводит к уширению импульса сигнала, проходящего по волокну.

Материальной дисперсией называют явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества n от длины волны света.

Волноводная дисперсия определяется зависимостью коэффициента фазы от частоты.

Уширение импульсов из-за материальной дисперсии:

$$\tau_{\text{мат}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d \lambda} \cdot l, \quad (14)$$

где

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

λ – длина передаваемой волны;

c – скорость света;
 l – длина линии.

Уширение импульсов из-за волновой дисперсии:

$$\tau_{\text{ВВ}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2n_1^2 \Delta l}{c}, \quad (15)$$

где

Δ – относительное соотношение показателей преломления;
 l – длина линии;
 λ – длина передаваемой волны;
 $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии источника излучения;
 c – скорость света.

Уширения импульсов из-за профильной дисперсии:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{n_1^2}{cn} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\Delta} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} - \frac{m_1}{n_1} \right) \cdot \left[2(\Gamma - b) + v \frac{\partial^2(bv)}{\partial v^2} \right] l, \quad (16)$$

где

n – эффективный показатель преломления [$n^2 = bn_1^2 + (1 - b) \cdot n_2^2$];
 b – нормированная постоянная распространения;
 m_1 – групповой показатель преломления сердцевины;
 Γ – коэффициент локализации по мощности;
 v – нормированная частота.
 c – скорость света;
 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$;
 n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки;
 λ – длина передаваемой волны;
 l – длина линии.

Резльтирующее значение уширения импульсов за счет модовой, материальной, волноводной и профильной дисперсии:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мод}} + \tau_{\text{ВВ}}) + \tau_{\text{пр}}]^2}. \quad (17)$$

Для инженерных расчетов в первом приближении можно использовать упрощенные формулы, не учитывающие профиль показателя преломления.

Величина уширения импульсов из-за **материальной дисперсии:**

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

где

$\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника, обычно соответствует 1-3 нм для лазера и 20-40 нм для светоизлучающих диодов, нм;
 $M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия, значения которой приведены в таблице 1, пс/(км · нм);
 l – длина линии, км.

Таблица 1 – Удельная материальная дисперсия

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

Величина уширения импульсов из-за **волноводной дисперсии:**

$$\tau_{\text{ВВ}} = \Delta\lambda \cdot l \cdot V(\lambda),$$

где

$\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника, нм;

$V(\lambda)$ – удельная волноводная дисперсия, значения которой приведены в таблице 2, пс/(км · нм);

l – длина линии, км.

Таблица 2 - Удельная волноводная дисперсия

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

Величина уширения импульсов из-за **профильной дисперсии** (это выражение справедливо для одномодовых волокон при реальной флуктуации границы раздела профиля показателя преломления):

$$\tau_{пр} = \Delta\lambda \cdot l \cdot П(\lambda),$$

где

$\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника, нм;

$П(\lambda)$ – удельная профильная дисперсия, значения которой приведены в таблице 3, пс/(км · нм);

l – длина линии, км.

Таблица 3 – Удельная профильная дисперсия

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

Ширина полосы пропускания оптического волокна:

$$\Delta F = \frac{k}{\tau}, \text{ МГц}, \quad (18)$$

где

k - коэффициент, учитывающий форму оптического импульса (от 0,644 при гауссовской форме импульса до 0,6 при прямоугольных импульсах);

τ – уширение импульса.

Ширина полосы пропускания оптического волокна при известной нормированной полосе пропускания на один километр (ΔF_l) для коротких линий, меньше, чем длина установившегося режима ($l_x < l_c$):

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_l}{l_x}. \quad (19)$$

Критическая частота — наименьшая частота, при которой возможно распространение данного типа волны в линии передачи.

Соответственно, **критическая длина волны** - наибольшая длина волны, выше которой распространение данного типа волн в волноводе невозможно.

Критическая частота:

$$f_0 = \frac{P_{nm} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ Гц}, \quad (20)$$

где

c – скорость света;

n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки;

P_{nm} – значения корней функции Бесселя для различных типов волн;

d – диаметр сердцевины оптического волокна.

Критическая длина волны:

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ мкм}, \quad (21)$$

где

n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки;

P_{nm} – значения корней функции Бесселя для различных типов волн;
 d – диаметр сердцевины оптического волокна.

Затухание в оптическом волокне является важнейшим параметром оптических кабелей, определяется собственными потерями и дополнительными потерями, так называемыми кабельными, обусловленными скруткой, деформацией и изгибами оптических волокон при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k. \quad (22)$$

Собственные потери волокна состоят из потерь на поглощении и рассеянии:

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p. \quad (23)$$

Затухание за счет поглощения связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала оптического волокна. Потери на рассеянии (рэлеевское рассеяние) определяются неоднородностями материала волокна и тепловой флуктуацией показателя преломления. Потери на рэлеевское рассеяние определяют нижний предел потерь, присущих волоконным световодам.

В световоде существует три окна прозрачности:

- первое окно прозрачности на длине волны 0,85 мкм;
- второе окно прозрачности – 1,3 мкм;
- третье окно прозрачности – 1,55 мкм.

Наименьшее затухание имеется в третьем окне прозрачности.

Затухание, обусловленное кабельными потерями, состоит из суммы, по крайней мере, семи видов парциальных коэффициентов затухания:

$$\alpha_k = \sum_{i=1}^7 \alpha_i', \quad (24)$$

где α_1' – возникает вследствие приложения к ОВ термомеханических воздействий в процессе изготовления кабеля;

α_2' – вследствие температурной зависимости коэффициента преломления материала ОВ;

α_3' – вызывается микроизгибами ОВ;

α_4' – возникает вследствие нарушения прямолинейности ОВ (скрутка)

α_5' – возникает вследствие кручения ОВ относительно его оси (осевые напряжения скручивания);

α_6' – возникает вследствие неравномерности покрытия ОВ;

α_7' – возникает вследствие потерь в защитной оболочке.

В ряде случаев микроизгибы могут существенно влиять на прирост α_k . Значение потерь на одном микроизгибе может изменяться в пределах 0,01 – 0,1 дБ.

Вследствие приращения **затухания от микроизгибов** можно определить из выражения:

$$\alpha_3' = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^2}{\Delta^3 b^6} \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{3/2}, \quad (25)$$

где $k_3 = 0,9 - 1,0$;

N_n – число неоднородностей в виде выпуклостей со средней высотой y_n на единицу длины;

a – радиус сердцевины;

b – диаметр сердцевины оптического волокна.

Δ - относительное соотношение показателей преломления;

n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки;

E_o и E_c – модули Юнга оболочки и сердцевины ОВ.

Затухание в местах соединений оптических волокон может достигать больших величин. На затухание сраста большого значения оказывает поперечное смещение и смещение осей.

При радиальном смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_\delta = 10 \lg \frac{d}{d-\delta}, \text{ дБ}, \quad (26)$$

где d – диаметр сердцевины ОВ;

δ – радиальное смещение ОВ.

При угловом смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_{\theta} = 10 \lg \frac{\theta_A}{\theta_A - \theta}, \text{ дБ}, \quad (27)$$

где θ_A - апертурный угол волокна;

θ – угловое смещение ОВ.

При осевом смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_s = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \cdot \operatorname{tg} \theta_A}, \text{ дБ}, \quad (28)$$

где θ_A - апертурный угол волокна;

d – диаметр сердцевины ОВ;

S – осевое смещение ОВ.

Приведенные выражения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными, если значения δ, θ, S достаточно малы ($\delta/d \leq 1, S/d \leq 1, \theta < 10^0$). Наиболее жесткие требования предъявляются при радиальном и угловом смещении. Наличие зазора между торцами волокон существенно меньше влияет на потери.

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 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 ОВ в пределах нормы?

Решение:

Для решения этой задачи определим конструктивные параметры оптического волокна, используемого в данном кабеле. Из документации на кабель находим, что в кабеле типа ОКК-50-01-4 используется градиентное оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки $=125 \pm 3$ мкм и диаметром сердцевины $=50 \pm 3$ мкм. Передача сигналов осуществляется на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм. Для дальнейшего решения воспользуемся формулой для определения числа передаваемых мод:

$$N = \frac{V^2}{4} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 - \text{ для градиентного профиля,}$$

где V – нормированная частота, a – радиус сердцевины волокна, n_1 – показатель преломления сердцевины волокна, n_2 – показатель преломления оболочки, λ – длина волны оптического сигнала.

$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – относительное значение показателя преломления оптического волокна.

Но вначале определим значение показателя преломления n_1 :

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1 - 2\Delta}},$$

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

Число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01-4:

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25 \text{ мкм}}{1,3 \text{ мкм}} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 164.$$

Определим на сколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы. Из [2] следует, что диаметр сердцевины может меняться в пределах 50 ± 3 мкм. Поэтому минимальное число будет равно:

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot (25 - 1,5) \text{ мкм}}{1,3 \text{ мкм}} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 145.$$

Максимальное число мод будет равно:

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot (25 + 1,5) \text{ мкм}}{1,3 \text{ мкм}} \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} \right)^2 = 184.$$

Таким образом, число мод может меняться на 39.

Ответ: $N_1 = 164$ мод, $N_2 = 145$ мод, $N_3 = 184$ моды, $\Delta N = 39$ мод.

Задача 2.

Определите 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:

Для решения задачи воспользуемся формулой:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} - \text{нормированная частота,}$$

где a – радиус сердцевины волокна, мкм

λ – длина волны, мкм.

Предварительно определим из документации на кабель конструктивные параметры оптических волокон, используемых в кабелях типа ОКК-50-01 и ОКК-10-01. В кабеле типа ОКК-50-01 используется градиентное оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 мкм и диаметром сердцевины = 50 мкм. В кабеле типа ОКК-10-01 используется одномодовое оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 мкм и диаметром сердцевины = 10 мкм. Передачи сигналов осуществляется на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм.

Вначале определим значение коэффициента преломления n_2 . Для этого воспользуемся формулой:

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}$$

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

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

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

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

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

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

Ответ: нормированная частота оптического волокна кабеля типа ОКК-10-01 меньше нормированной частоты оптического волокна кабеля типа ОКК-50-01 в 5 раз.

Задача 3.

Определите какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОКК-50-01-4 возникли дополнительные микроизгибы.

Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta = 0,0053$, $N_n = 100$, $y_n = 0,0025$ мм, $E_0 = 6,9 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $E_c = 6,2 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Решение:

Для решения этой задачи определим конструктивные параметры оптического волокна, используемого в данном кабеле. Из справочных данных находим, что в кабеле типа ОКК-50-01-4 используется градиентное оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 мкм и диаметром сердцевины = 50 мкм. Для дальнейшего решения воспользуемся формулой:

$$\alpha'_3 = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 \cdot b^6} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{3/2},$$

где $k_3 = 0,9 \div 1,0$;

N_n – число неоднородностей в виде выпуклостей со средней высотой y_n на единицу длины;

a – радиус сердцевины;

b – диаметр оптической оболочки;

Δ – относительное значение показателя преломления;

E_0 и E_c – модули Юнга оболочки и сердцевины ОВ.

$$\alpha'_3 = 0,9 \cdot 100 \cdot 2,5^2 \frac{25^4}{0,00533 \cdot 125^6} \left(\frac{6,9 \cdot 10^8}{6,2 \cdot 10^{10}} \right)^{3/2} = 0,29 \text{ дБ/км.}$$

Ответ: $\alpha'_3 = 0,29 \text{ дБ/км.}$

Задача 4.

При сращивании строительных длин оптического кабеля ОКК-10-01 в одном из волокон произошло радиальное смещение торцов на 1 мкм. Определите возникшие при этом дополнительные потери.

Решение:

Для решения этой задачи необходимо воспользоваться формулой:

$$A_\delta = 10 \ln \frac{d}{d-\delta}, \text{ дБ,}$$

где d – диаметр сердцевины ОВ;

δ – радиальное смещение ОВ.

Также необходимы конструктивные параметры оптического волокна, используемого в кабеле ОКК-10-01. В этом кабеле используется одномодовое оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки = 125 мкм и диаметром сердцевины = 10 мкм.

Тогда дополнительные потери при радиальном смещении на 1 мкм будут равны:

$$A_\delta = 10 \ln \frac{10}{10-1} = 0,46 \text{ дБ.}$$

Ответ: $A_\delta = 0,46 \text{ дБ.}$

Задача 5.

Определите какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 2, 2,5 и 3 мкм.

Решение:

Для решения этой задачи воспользуемся формулой, оценивающей потери в кварцевых волоконных световодах в инфракрасной области спектра. Для дальнейших расчетов выберем следующие постоянные коэффициенты: $C=0,9$ и $k = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$

При передаче сигнала на длине волны 2 мкм следует ожидать дополнительное затухание в инфракрасной области спектра величиной:

$$\Delta\alpha_1 = C \cdot e^{-k/\lambda} = 0,9 \cdot e^{-0,8 \cdot 10^{-6}/2 \cdot 10^{-6}} = 0,603 \text{ дБ/км.}$$

При передаче сигнала на длине волны 2,5 мкм дополнительное затухание будет составлять:

$$\Delta\alpha_2 = 0,9 \cdot e^{-0,8 \cdot 10^{-6}/2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,654 \text{ дБ/км.}$$

При передаче сигнала на длине волны 3 мкм дополнительное затухание будет составлять:

$$\Delta\alpha_3 = 0,9 \cdot e^{-0,8 \cdot 10^{-6}/3 \cdot 10^{-6}} = 0,689 \text{ дБ/км.}$$

Ответ: $\Delta\alpha_1 = 0,603 \text{ дБ/км; } \Delta\alpha_2 = 0,654 \text{ дБ/км; } \Delta\alpha_3 = 0,689 \text{ дБ/км.}$

Задача 6.

С течением времени в разъёмном соединителе стационарного оптического кабеля ОКС-50-01 произошло осевое смещение торцов одного оптического волокна на 25 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta = 0,01$; $n_1 = 1,49$.

Решение:

В кабеле типа ОКС-50-01 используется многомодовое оптическое волокно с диаметром отражающей оболочки $d_2 = 125 \text{ мкм}$ и диаметром сердцевины $d_1 = 50 \text{ мкм}$.

Предварительно определим значение коэффициента преломления n_1 . Для этого воспользуемся формулой:

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

Следующим этапом определим апертурный угол оптического волокна. Найдем значение числовой апертуры в ОВ оптического кабеля типа ОКС-50-01:

$$NA = \sin\theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,490^2} = 0,212.$$

$$\theta_A = \arcsin x = x + \frac{x^3}{2 \cdot 3} + \frac{1 \cdot 3 x^5}{2 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 x^7}{2 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 x^9}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} + \dots = 0,212 + \frac{0,212^3}{2 \cdot 3} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 0,212^5}{2 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 0,212^7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} + \dots = 0,214 \text{ рад} = 12,3^\circ.$$

Дополнительные потери при осевом смещении торцов оптического волокна на 25 мкм будут равны:

$$A_S = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \cdot \operatorname{tg} \theta_2} = 10 \lg \frac{2 \cdot 50}{2 \cdot 50 - 25 \cdot \operatorname{tg} 12,3^\circ} = 0,24 \text{ дБ}.$$

Ответ: $A_S = 0,24$ дБ.

Задача 7.

На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей ОК-50-2 и ОКК-50-01. Определите во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС 9 км, $n_2 = 1,490$, $\Delta n = 0,015$.

Решение:

Предварительно определим значение коэффициента преломления n_1 и относительное соотношение показателей преломления - Δ через разность показателей преломления:

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

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. Рассчитаем дисперсию для ОК-50-2, учитывая, что используется многомодовое ступенчатое волокно, длина связи мод равна 5 км:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta \cdot n_1}{c} \sqrt{l \cdot l_c} = \frac{0,01 \cdot 1,505}{3 \cdot 10^5} \cdot \sqrt{9 \cdot 5} = 0,336 \text{ мкс}.$$

Рассчитаем дисперсию в ОКК-50-01, в кабеле используется градиентное оптическое волокно, для связи мод равна 10 мкм:

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

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

Ответ: уширение импульсов в ОКК-50-01 в 150,7 раз меньше, чем в кабеле ОК-50-2.

Задача 8.

Определите 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, работающие на длине волны 1,55 мкм, то необходимо будет рассчитать хроматическую дисперсию, которая делится на материальную, волноводную и профильную.

Для расчетов материальной дисперсии используем упрощенную формулу и данные из таблицы 1, в которой приведены значения удельной материальной дисперсии.

Дисперсия при работе лазерного источника излучения будет равна:

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

Дисперсия при светодиодном источнике равна:

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

Для расчетов волноводной дисперсии используем упрощенную формулу и данные из таблицы 2 для удельной волноводной дисперсии.

Дисперсия при работе лазерного источника излучения будет равна:

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

Дисперсия при светодиодном источнике равна:

$$\tau_{\text{ВВ}} = \Delta\lambda B(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 5 = 6,3 \text{ мкс.}$$

Для расчетов профильной дисперсии используем тоже упрощенную формулу и данные таблицы 3.

Дисперсия при работе лазерного источника излучения будет равна:

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

Дисперсия при световодном источнике равна:

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

Результирующее значение дисперсии при работе лазерного источника излучения определяется из выражения:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{ВВ}}) + \tau_{\text{пр}}]^2} = \sqrt{0 + [(131,04 \cdot 10^{-6} + 6,30 \cdot 10^{-6}) + 0]^2} = 23 \text{ пс.}$$

Результирующее значение дисперсии при светодиодном источнике равно:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мод}}^2 + [(\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{ВВ}}) + \tau_{\text{пр}}]^2} = \sqrt{0 + [(-1,134 \cdot 10^{-6} + 0,765 \cdot 10^{-6}) + 0,346 \cdot 10^{-6}]^2} = 137,34 \text{ мкс.}$$

Следовательно, дисперсия сигнала возрастает в 5971 раз.

Ответ: дисперсия сигнала при работе лазерного источника в 5971 раз меньше, чем при работе светодиодного источника.

3. ЗАДАНИЕ

Вариант задания определяется в соответствии с последней цифрой студенческого номера студенческого билета. Необходимо решить три задачи с подробным описанием хода решения. Для определения конструктивных параметров оптических волокон воспользуйтесь данными из документации на заданный оптический кабель.

Номер варианта	Задача № 1	Задача № 2	Задача № 3
ВАРИАНТ 1 <i>последняя цифра номера студенческого билета 0 - 3</i>	Определите на сколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а во втором окне прозрачности. Параметры оптического волокна: $n_2 = 1,495$, $\Delta = 0,011$, $tg\delta = 10^{-11}$.	Определите во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты оптического кабеля ОКЛБ-01-0,3 при $n_1 = 1,5$, $\Delta = 0,011$.	При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу к линейному оптическому кабелю ОКК-50-01 произошло угловое смещение торцов волокна на 3° . Определите возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta = 0,01$; $n_1 = 1,505$.
ВАРИАНТ 2 <i>последняя цифра номера студенческого билета 4 - 6</i>	Определите число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-2-5-4, при $n_2 = 1,5$, $\Delta = 0,012$. На сколько изменится	На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей ОК-50-01 и ОКК-50-02. Определите во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС	Определите во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОМЗКГ, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный ($c \lambda =$

	число мод при увеличении диаметра сердцевины волокна ОВ в пределах нормы?	составляет 11 км, $n_2 = 1,492$, $\Delta n = 0,01$.	0,87 мкм). Длина ВОЛС составляет 48 км.
ВАРИАНТ 3 <i>последняя цифра номера студенческого билета 7 - 9</i>	Определите какое дополнительное затухание следует ожидать в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛС-01, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 1,8, 2,3 и 2,9 мкм.	При соединении оптоволоконного шнура в кроссовом оптическом шкафу к линейному оптическому кабелю ОК-50-2-3-8, произошло смещение торцов волокна на 8° . Определите возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta = 0,009$, $n_1 = 1,5$.	Определите на сколько отличается величина числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля 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-10-01 $n_1 = 1,510$.

Список используемых источников:

1. Иванов С.И., Коршунов В.Н., Ксенофонтов С.Н. Сборник упражнений и задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебное пособие/МЭИС. – М., 1987.
2. Справочник. Волоконно-оптические системы передачи и кабели/Под редакцией И.И. Гроднева. – М.: Радио и связь, 1993.