

*М.С.Былина, В.С. Иванов, Г.М. Смирнов*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

для студентов, обучающихся по направлению 11.03.02

«Инфокоммуникационные системы и сети связи»

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>5</b>
1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы ..	5
2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах.....	5
3. Конструкции и производство оптических волокон и кабелей .....	5
4. Затухание в оптических волокнах .....	5
5. Многомодовые оптические волокна.....	5
6. Одномодовые оптические волокна .....	5
7. Пассивные оптические компоненты .....	6
8. Передающие устройства ВОЛС.....	6
9. Фотоприемные устройства .....	6
10. Измерения параметров ВОЛС .....	6
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>7</b>
<b>КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ .....</b>	<b>9</b>
Задание 1. Расчет зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны. ....	9
Исходные данные к заданию 1 .....	9
Методические указания к выполнению задания 1 .....	9
Порядок выполнения задания 1 .....	11
Задание 2. Расчет зависимости уширения оптических импульсов в одномодовом ОВ, обусловленного хроматической дисперсией, от длины волны. ....	12
Исходные данные к заданию 2 .....	12
Методические указания к выполнению задания 2 .....	13
Порядок выполнения задания 2 .....	16

## ВВЕДЕНИЕ

Особое значение оптических и оптоэлектронных технологий для науки и техники, в том числе и для инфокоммуникаций, признано мировым сообществом. В июле 2013 года правительством Российской Федерации утвержден план мероприятий «дорожная карта» «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)» с детализацией до 2018 года.

В соответствии с планом, принятым на период 2013-2018 гг., одной из целей деятельности Министерства связи и массовых коммуникаций, делегированной Правительством РФ, является равный доступ к услугам связи и Интернету. К 2018 году планируется обеспечить широкополосным кабельным интернетом 80% жителей России, причем магистральным подключением по волоконно-оптическим линиям связи должны быть обеспечены все населенные пункты с численностью населения более 8 тысяч человек. Для достижения этой цели инвестиции операторов и Фонда универсальной услуги связи направляются на создание инфраструктуры оптоволоконных линий по всей стране.

Волоконно-оптические сети и системы быстро развиваются, на сегодняшний день уже достигнуты терабитные скорости передачи по одному волокну на расстояния сотни и тысячи километров без регенерации. На повестке дня стоят вопросы широкого внедрения:

- когерентных систем приема сигналов со скоростями 100 Гбит/с, по каждому из десятков каналов, передаваемых по одному оптическому волокну,
- передачи информации на тысячи километров без промежуточной регенерации с помощью оптических солитонов,
- использования отдельных мод в многомодовом волокне для передачи многоканальных сигналов

и многие другие вопросы.

Поэтому студенты, обучающиеся в СПбГУТ по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» должны иметь современные базовые знания в области оптических и оптоэлектронных технологий.

Целью преподавания дисциплины «Физические основы оптических направляющих систем» является изучение физических процессов излучения и приема оптического излучения, распространения излучения по современным оптическим волокнам, ознакомление с конструкциями и параметрами оптических волокон и кабелей, пассивных и активных оптических компонент, с методами и приборами для измерения параметров волоконно-оптических линейных трактов.

Основные задачи дисциплины заключаются в изучении методов проектирования и строительства волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в оз-

накоплении с особенностями эксплуатации ВОЛС, получении навыков теоретических исследований, умения работать с технической литературой и специальной измерительной аппаратурой.

По дисциплине предусмотрены лабораторные и практические занятия, а также выполнение контрольной работы. Защита контрольной работы, а также сдача зачета по лабораторным и практическим занятиям предшествуют сдаче экзамена по дисциплине.

# **ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

## **1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы**

Особенности оптической передачи сигналов по направляющим системам связи. Преимущества и недостатки ВОЛС по сравнению с металлическими линиями связи. Элементы волоконного тракта: оптический кабель, соединительные муфты, оконечные пункты, регенераторы, источники и приемники излучения, оптические усилители. Спектральное уплотнение.

## **2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах**

Геометрическая и волновая оптика. Поляризация света. Отражение и преломление света на границе раздела двух сред. Формулы Френеля, явление полного внутреннего отражения. Направляемые и вытекающие моды (лучи).

## **3. Конструкции и производство оптических волокон и кабелей**

Классификация кабелей, маркировка, элементы конструкции, используемые материалы. Технология производства оптических волокон и кабелей. Методы испытаний оптических волокон и кабелей.

## **4. Затухание в оптических волокнах**

Затухание в оптическом волокне. Единицы измерения затухания. Собственные и дополнительные потери. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны. Окна прозрачности. Влияние затухания на длину регенерационного участка. Влияние затухания на минимальную длину сегмента сети.

## **5. Многомодовые оптические волокна**

Траектории лучей в ступенчатых и градиентных оптических волокнах. Понятие моды. Нормированная частота. Количество мод. Межмодовая дисперсия. Широкополосность. Равновесное распределение мод. Ввод излучения в оптическое волокно. Числовая апертура. Потери на вводе излучения. Влияние широкополосности на максимальную длину сегмента сети. Многомодовые волокна с усеченным степенным профилем. Рекомендация МСЭ G.651. Многомодовые волокна для высокоскоростных сетей.

## **6. Одномодовые оптические волокна**

Условие одномодового режима распространения излучения. Длина волны отсечки. Хроматическая дисперсия. Материальная и волноводная дисперсия. Длина волны нулевой дисперсии. Диаметр модового поля. Влияние хроматической дисперсии на длину регенерационного участка. Рекомендации

МСЭ. Классификация и параметры современных одномодовых оптических волокон.

### **7. Пассивные оптические компоненты**

Особенности и параметры пассивных компонентов. Разъемные и неразъемные соединения оптических волокон. Вносимые и возвратные потери в соединениях. Конструкции и параметры разъемных соединителей. Механические соединители. Оптические разветвители. Оптические интерференционные фильтры. Устройства WDM. Оптические изоляторы. Оптические аттенюаторы.

### **8. Передающие устройства ВОЛС**

Требования к передающим устройствам. Источники излучения. Светодиоды, их параметры и конструкции. Спонтанная люминесценция. Лазерные диоды, их параметры и конструкции. Вынужденная люминесценция. Внутренняя и внешняя модуляция. Структурная схема передающего устройства. Модуляторы.

### **9. Фотоприемные устройства**

Фотодиоды, их параметры, конструкции, схемы включения. Лавинный фотодиод. Источники шума в фотоприемных устройствах. Параметры фотоприемных устройств.

### **10. Измерения параметров ВОЛС**

Задачи технической эксплуатации. Измерение основных параметров волоконно-оптических трактов с помощью оптических тестеров и рефлектометров. Плановые и аварийные измерения. Определение расстояний до мест повреждений и неоднородностей.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная:*

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи : учебник для вузов. В 2-х томах. Т. 1. Теория передачи и влияния / В. А. Андреев, Э. Л. Портнов, Л. Н. Кочановский. - 7-е изд., перераб. и доп. - М. : Горячая линия–Телеком, 2009. – 424 с.
2. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи : учебник для вузов. В 2-х томах. Т. 1. Теория передачи и влияния [Электронный ресурс] / В. А. Андреев, Э. Л. Портнов, Л. Н. Кочановский. - М. : Горячая линия–Телеком, 2011. - 424 с.
3. Глаголев, С. Ф. Физические основы оптических направляющих систем [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Федер. агентство связи, ГОУ ВПО «СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». - СПб. : СПбГУТ, 2008. – 160 с.
4. Гитин, В. Я. Волоконно-оптические телекоммуникационные системы и сети : учебное пособие (спец. 210400) / В. Я. Гитин, С. Ф. Глаголев, Л. Н. Кочановский ; рец.: В. Н. Коршунов, В. С. Эмдин ; Федеральное агентство связи, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». - СПб. : СПбГУТ, 2006. - 176 с.

### *Дополнительная*

1. Иоргачев, Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи : науч. издание / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. - М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. - 282 с.
2. Глаголев, С. Ф. Передаточные характеристики оптических волокон [Электронный ресурс] : учебное пособие (спец. 210401, 210404, 210406) / С. Ф. Глаголев, В. С. Иванов, Л. Н. Кочановский ; рец. Б. К. Чернов ; Федеральное агентство связи, СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2005. - 80 с.
3. Волоконно-оптическая техника : современное состояние и новые перспективы [Текст] : сборник статей / ред.: С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Техносфера, 2010. - 607 с.
4. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / М. С. Былина [и др.] ; ред. С. Ф. Глаголев ; рец. Б. К. Чернов ; М-во РФ по связи и информатизации, СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2002. - 78 с.
5. Былина, М. С. Физические основы оптических направляющих систем [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев ; ред. С. Ф. Глаголев ; рец. В. И. Дудкин ; Федеральное агентство связи, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-

- Петербургский государственный университет телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». - СПб. : СПбГУТ, 2010. - 84 с.
6. Иванов, В. С. Физические основы оптических направляющих систем [Электронный ресурс] : методические указ. к контрольной работе (спец. 201000) / В. С. Иванов, Г. М. Смирнов ; Министерство информационных технологий и связи РФ, СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича, Факультет вечернего и заочного обучения. - СПб. : СПбГУТ, 2005. - 12 с.
  7. Скляр, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учеб. пособие / О. К. Скляр. - 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 265 с.
  8. Скляр, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс] : учебное пособие / Скляр О. К. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 266 с.



# КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Номер варианта контрольной работы определяется предпоследней цифрой номера зачетной книжки.

## Задание 1. Расчет зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны.

Рассчитать зависимости коэффициента затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленного поглощением, коэффициента затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленного релеевским рассеиванием, а также результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  оптического волокна (ОВ) в заданном диапазоне длин волн  $\lambda$ .

Построить графики зависимостей  $\alpha_a(\lambda)$ ,  $\alpha_s(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ .

### *Исходные данные к заданию 1*

В табл. 1 указаны верхняя  $\lambda_{\max}$  и нижняя  $\lambda_{\min}$  границы диапазона длин волн, в пределах которого следует провести расчеты  $\alpha_a(\lambda)$ ,  $\alpha_s(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ .

Таблица 1. Длины волн, на которых проводятся расчеты

Номер варианта	$\lambda_{\min}$ , мкм	$\lambda_{\max}$ , мкм
0	1.231	1.463
1	1.150	1.420
2	1.252	1.610
3	1.282	1.550
4	1.304	1.570
5	1.334	1.600
6	1.329	1.565
7	1.275	1.516
8	1.225	1.436
9	1.238	1.498

Значения длин волн в соседних точках, на которых будут проводиться расчеты, должны отличаться не более чем на 10 нм.

### *Методические указания к выполнению задания 1*

Затухание в оптическом волокне характеризует ослабление оптической мощности, распространяемой вдоль ОВ, и выражается в дБ. Величина затухания, отнесенная к единице длины волокна, называется коэффициентом затухания и выражается в дБ/км.

Потери, возникающие при распространении сигнала по однородному кварцевому ОВ, объясняются в основном двумя причинами:

- поглощением оптического излучения частицами материала – самого кварцевого стекла и вредных примесей,
- релеевским рассеянием оптического излучения.

Поэтому результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  можно представить в виде суммы коэффициентов затухания, обусловленных поглощением  $\alpha_a(\lambda)$  и рассеянием  $\alpha_s(\lambda)$ :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_s(\lambda). \quad (1)$$

Коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, в свою очередь складывается из:

- коэффициентов остаточных потерь из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной  $\alpha_{inf}(\lambda)$  и ультрафиолетовой  $\alpha_{ult}(\lambda)$  областях спектра;
- коэффициентов потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН<sup>-</sup>, которые обуславливают мощные резонансы на длинах волн 1.29 и 1.383 мкм, а также более слабые пики в области длин волн 1.13, 0.95, 0.875, 0.825 и 0.725 мкм;
- коэффициентов потерь  $\alpha_{imp}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на других вредных примесях, в том числе, на ионах металлов переходной группы (Fe, Cu, Cr, Ni, Mn), которые вызывают ряд полос поглощения в диапазоне длин волн 0.5–1.5 мкм.

Перечисленные коэффициенты потерь могут быть рассчитаны по приведенным ниже формулам.

Для коэффициентов остаточных потерь из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной  $\alpha_{inf}(\lambda)$  и ультрафиолетовой  $\alpha_{ult}(\lambda)$  областях спектра справедливы соотношения

$$\alpha_{inf}(\lambda) = A_{inf} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_{inf}}{\lambda}\right), \quad (2)$$

$$\alpha_{ult}(\lambda) = A_{ult} \cdot \exp\left(\frac{\lambda_{ult}}{\lambda}\right), \quad (3)$$

где  $A_{inf} = 7.81 \cdot 10^{11}$  дБ/км,  $\lambda_{inf} = 48.5$  мкм,  $A_{ult} = 2.55 \cdot 10^{-3}$  дБ/км,  $\lambda_{ult} = 4.63$  мкм.

Для расчета коэффициентов потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН<sup>-</sup> можно использовать выражение:

$$\alpha_{OH}(\lambda) = \sum_{i=1}^K \frac{\Delta\lambda_i \cdot g_i}{2\pi \left[ (\lambda - \lambda_i)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_i}{2}\right)^2 \right]}, \quad (4)$$

где  $K$  – число учитываемых при расчете резонансов,  $\lambda_i$  – центральная длина волны  $i$ -го резонанса,  $\Delta\lambda_i$  – спектральная ширина  $i$ -го резонанса,  $g_i$  – амплитуда  $i$ -го резонанса.

В контрольной работе предлагается учесть только два основных резонанса, вызванных гидроксильными группами  $\text{OH}^-$ , параметры которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры для расчета  $\alpha_{\text{OH}}(\lambda, \lambda_{\text{OH}})$

Номер резонанса	Резонансная длина волны, мкм	Спектральная ширина резонанса, нм	Амплитуда резонанса, дБ·нм/км
1	1.290	30	2.0
2	1.383	30	10

Коэффициенты потерь  $\alpha_{\text{imp}}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на других вредных примесях при современном уровне технологии производства ОВ практически сведены к нулю в широком диапазоне длин волн (0.7–1.6 мкм), поэтому в контрольной работе их расчет не предполагается.

Таким образом, коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, можно рассчитать по выражению:

$$\alpha_a(\lambda) = \alpha_{\text{inf}}(\lambda) + \alpha_{\text{ult}}(\lambda) + \alpha_{\text{OH}}(\lambda). \quad (5)$$

Коэффициент затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленный релеевским рассеянием, можно рассчитать по выражению:

$$\alpha_s(\lambda) = \frac{k_s}{\lambda^4}, \quad (6)$$

где  $k_s$  – коэффициент рассеивания, зависящий от технологии производства ОВ. В данной контрольной работе примем его равным 0,8 мкм<sup>4</sup>·дБ/км. Потери на релеевское рассеивание определяют нижний предел потерь, присущих ОВ.

### **Порядок выполнения задания 1**

1. Определить по табл. 1 диапазон длин волн, в пределах которого нужно провести расчеты.

2. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент остаточных потерь  $\alpha_{\text{inf}}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной области по формуле (2).

3. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент остаточных потерь  $\alpha_{\text{ult}}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения кварца в ультрафиолетовой области по формуле (2).

4. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН по выражению (4), считая, что  $K = 2$ . Параметры резонансов взять из табл. 2.

5. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, по выражению (5). Построить график  $\alpha_a(\lambda)$ .

6. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленный релеевским рассеянием, по выражению (6). Построить график  $\alpha_s(\lambda)$ .

7. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  по выражению (1). Построить график  $\alpha(\lambda)$ .

8. Сформулировать выводы.

### **Задание 2. Расчет зависимости уширения оптических импульсов в одномодовом ОВ, обусловленного хроматической дисперсией, от длины волны.**

Рассчитать зависимости показателей преломления сердцевин  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОВ от длины волны. Построить графики зависимостей  $n_1(\lambda)$  и  $n_2(\lambda)$ .

Рассчитать зависимости коэффициентов материальной  $D_{mat}(\lambda)$ , волновой  $D_w(\lambda)$  и результирующей хроматической  $D_{chr}(\lambda)$  дисперсии ОВ от длины волны. Построить графики зависимостей  $D_{mat}(\lambda)$ ,  $D_w(\lambda)$  и  $D_{chr}(\lambda)$ .

Рассчитать зависимость уширения оптических импульсов  $\Delta t(\lambda)$  за счет хроматической дисперсии в стандартном одномодовом ОВ (ОМ ОВ) от длины волны. Построить график зависимости  $\Delta t(\lambda)$ .

#### *Исходные данные к заданию 2*

Диапазон длин волн для проведения расчетов определен в исходных данных к заданию 1.

В табл. 3 приведены исходные данные для расчета зависимости показателей преломления сердцевин и оболочки ОВ. Смысл приведенных коэффициентов будет пояснен ниже.

Таблица 3. Параметры для расчета показателей преломления

Вариант	Состав стекла	Тип коэффициента	$i$		
			1	2	3
Оболочка ОВ					
1, 3, 5, 7, 9	SiO <sub>2</sub>	$A_i$	0.6961663	0.4079426	0.8974794
		$\lambda_i$ , мкм	0.0684043	0.1162414	9.896161
0, 2, 4, 6, 8	1.0% F 90.9% SiO <sub>2</sub>	$A_i$	0.691116	0.399166	0.890423
		$\lambda_i$ , мкм	0.068227	0.116460	9.993707

Вариант	Состав стекла	Тип коэффициента	<i>i</i>		
			1	2	3
Сердцевина ОВ					
0	13.5% GeO <sub>2</sub> 86.5% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.73454395 0.08697693	0.42710828 0.11195191	0.82103399 10.846540
1	7.0% GeO <sub>2</sub> 83.0% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.68698290 0.078087582	0.44479505 0.11551840	0.79073512 10.436628
2	4.1% GeO <sub>2</sub> 95.9% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.68671749 0.072675189	0.43481505 0.11514351	0.89656582 10.002398
3	3.1% GeO <sub>2</sub> 96.9% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7028554 0.0727723	0.4146307 0.1143085	0.8974540 9.896161
4	3.5% GeO <sub>2</sub> 96.5% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7042038 0.0514415	0.4160032 0.1291600	0.9074049 9.896156
5	5.8% GeO <sub>2</sub> 94.2% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7088876 0.06090053	0.4206803 0.1254514	0.8956551 9.896162
6	7.9% GeO <sub>2</sub> 92.1% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7136824 0.06117167	0.4254807 0.1270814	0.8964226 9.896161
7	19.3% GeO <sub>2</sub> 80.7% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7347008 0.0764679	0.4461191 0.1246081	0.8081698 9.896203
8	11.2% GeO <sub>2</sub> 88.8% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.7186243 0.0634539	0.4301997 0.1277683	0.8543265 9.896181
9	9.1% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90.9% SiO <sub>2</sub>	<i>A<sub>i</sub></i> <i>λ<sub>i</sub></i> , мкм	0.695790 0.061568	0.452497 0.119921	0.712513 8.656641

Ширину спектра оптического сигнала для своего варианта рассчитайте по формуле:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 + \Delta\lambda_1(N - 5), \quad (7)$$

где *N* – номер варианта,  $\Delta\lambda_0 = 1$  нм,  $\Delta\lambda_1 = 0.1$  нм.

Длину ОВ для своего варианта рассчитайте по формуле:

$$L = L_0 + L_1(N - 5), \quad (8)$$

где *N* – номер варианта,  $L_0 = 100$  км,  $L_1 = 5$  км.

Диаметр сердцевинны оптического волокна  $d_{core}$  для всех вариантов примите равным 10 мкм.

### **Методические указания к выполнению задания 2**

1. Расчет зависимостей показателей преломления сердцевинны  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОВ от длины волны и построение графиков этих зависимостей.

Спектральная зависимость показателей преломления стекол, используемых для изготовления оболочки и сердцевинны ОВ, в диапазоне 0.6–2 мкм хорошо описывается дисперсионной формулой Селлмейера:

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}. \quad (9)$$

В (9) входят резонансные длины волн  $\lambda_i$  и безразмерные коэффициенты  $A_i$ . Значения  $\lambda_i$  и  $A_i$  для различных стекол приведены в табл. 3.

2. Расчет зависимостей коэффициентов материальной  $D_{mat}(\lambda)$ , волноводной  $D_w(\lambda)$  и результирующей хроматической  $D_{chr}(\lambda)$  дисперсии стандартного ОМ ОВ от длины волны и построение графиков этих зависимостей.

Дисперсией ОВ называют явление уширения (увеличения длительности) оптических импульсов при распространении их по этому ОВ. Дисперсия ограничивает дальность и скорость оптической связи.

В ОМ ОВ основным видом дисперсии является *хроматическая дисперсия*, обусловленная различием групповых скоростей спектральных составляющих оптического сигнала.

Хроматическая дисперсия складывается из материальной и волноводной дисперсий. *Материальная дисперсия* обусловлена зависимостью показателя преломления сердцевины ОВ от длины волны. *Волноводная дисперсия* зависит от конструкции и размеров волновода.

Коэффициент хроматической дисперсии  $D_{chr}(\lambda)$  можно рассчитать по формуле:

$$D_{chr}(\lambda) = D_{mat}(\lambda) + D_w(\lambda). \quad (10)$$

Величины  $D_{chr}(\lambda)$ ,  $D_{mat}(\lambda)$  и  $D_w(\lambda)$  принято выражать в пс / (нм·км).

Коэффициент материальной дисперсии  $D_{mat}(\lambda)$  для стандартного ОМ ОВ можно рассчитать по формуле:

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}, \quad (11)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме. Для расчета второй производной показателя преломления сердцевины по длине волны  $n_1(\lambda)$  необходимо дважды продифференцировать (9), в результате получим:

$$\frac{dn_1(\lambda)}{d\lambda} = -\lambda \left( \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda_i^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^2} \right) / n_1(\lambda), \quad (12)$$

$$\frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} = \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda_i^2 (3\lambda^2 + \lambda_i^2)}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^3} - \left( \frac{dn_1(\lambda)}{d\lambda} \right)^2 \right] / n_1(\lambda). \quad (13)$$

Коэффициент волноводной дисперсии  $D_w(\lambda)$  для стандартного ОМ ОВ можно рассчитать по формуле:

$$D_w = \frac{\Delta(\lambda) n_1(\lambda)}{c \cdot \lambda} \cdot D(V(\lambda)) \cdot V(\lambda), \quad (14)$$

где  $V(\lambda)$  – нормированная частота,  $\Delta(\lambda)$  – высота профиля, которые рассчитываются по выражениям:

$$V(\lambda) = \frac{\pi d_{core}}{\lambda} \sqrt{n_1^2(\lambda) - n_2^2(\lambda)}, \quad (15)$$

$$\Delta(\lambda) = \frac{n_1^2(\lambda) - n_2^2(\lambda)}{2n_1^2(\lambda)}. \quad (16)$$

Безразмерный параметр  $D(V)$ , входящий в (14), называют параметром искажения. На рис. 1 представлена зависимость произведения  $D(V) \cdot V$  от  $V$ .

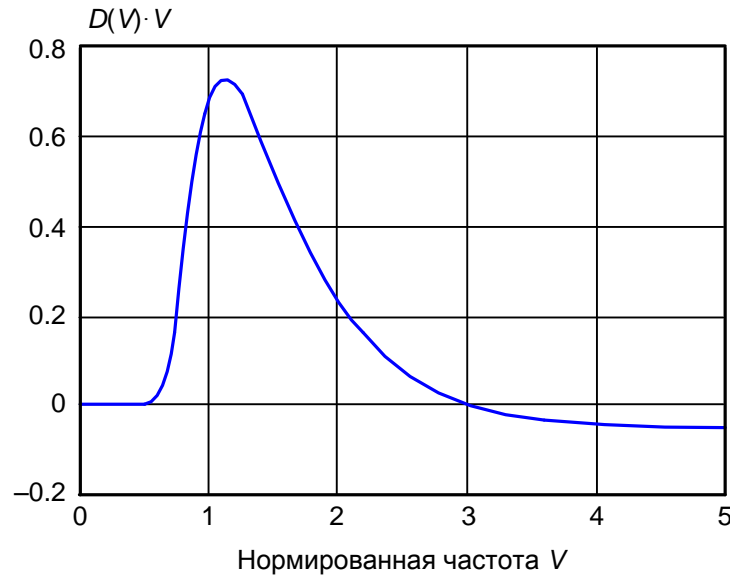


Рис. 1. Зависимость  $D(V) \cdot V$  от  $V$

Необходимые для проведения расчетов значения  $D(V) \cdot V$  можно определить непосредственно по графику или воспользоваться следующей функцией, аппроксимирующей  $D(V) \cdot V$  в диапазоне  $0.6 \leq V \leq 5$ :

$$D(V) \cdot V \approx \begin{cases} \frac{1.41}{(V - 0.55)^{1.5}} \exp\left(-\frac{0.86}{V - 0.55}\right) & \text{при } 0.6 \leq V \leq 1.1 \\ 0.82 \left(1 - \exp\left(-\frac{4.9}{V^{3.6}}\right)\right) - 0.056 & \text{при } 1.1 < V \leq 5 \end{cases}. \quad (17)$$

3. Расчет зависимости уширения оптических импульсов  $\Delta t(\lambda)$  за счет хроматической дисперсии в ОМ ОВ от длины волны и построения графика этой зависимости.

Уширение импульса  $\Delta t(\lambda)$ , обусловленное хроматической дисперсией, можно рассчитать по выражению:

$$\Delta t(\lambda) = |D_{chr}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda \cdot L, \quad (18)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра оптического сигнала,  $L$  – длина ОВ.

### **Порядок выполнения задания 2**

1. Определить по табл. 3 параметры оптических стекол сердцевины и оболочки стандартного ОМ ОВ.

2. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн показатели преломления сердцевины  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОМ ОВ от длины волны по формуле (9). Построить графики  $n_1(\lambda)$  и  $n_2(\lambda)$ .

3. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент материальной дисперсии  $D_{mat}(\lambda)$  ОМ ОВ по формулам (11), (12) и (13). Построить график  $D_{mat}(\lambda)$ .

4. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн высоту профиля  $\Delta(\lambda)$  ОМ ОВ по формуле (16).

5. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн нормированную частоту  $V(\lambda)$  по формуле (15).

6. Для каждого рассчитанного значения  $V(\lambda)$  по графику на рис. 1 или по формуле (17) определить значение произведения  $D(V) \cdot V$ .

7. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент волноводной дисперсии  $D_w(\lambda)$  ОМ ОВ по формуле (14). Построить график  $D_w(\lambda)$ .

8. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент хроматической дисперсии  $D_{chr}(\lambda)$  по формуле (10). Построить график  $D_{chr}(\lambda)$ .

9. Определить по формулам (7) и (8) длину волокна  $L$  и ширину спектра оптического сигнала  $\Delta\lambda$ .

10. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн уширение импульса  $\Delta t(\lambda)$ , обусловленное хроматической дисперсией, по выражению (18). Построить график  $\Delta t(\lambda)$ .

11. Сформулировать выводы.