



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

А.В. Сбитнев

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы

для студентов IV курса
специальности 10.05.02
очной формы обучения

Москва
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

Кафедра основ радиотехники и защиты информации
А.В. Сбитнев

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы

для студентов IV курса
специальности 10.05.02
очной формы обучения

Москва
2019

ББК 6Ф0.3
С-23

Рецензент:

Петров В.И. – канд. техн. наук, доцент

Сбитнев А.В.

С-23 Квантовая и оптическая электроника: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы./ А.В. Сбитнев. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 28 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» по учебному плану для студентов IV курса специальности 10.05.02 очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 23.04.2019 г.
и методического совета 23.04.2019 г.

В авторской редакции.

Подписано в печать 14.06.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 1,75 Усл. печ. л. 1,63

Заказ 485/3973 Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119 А, лит. Я, оф. 215

© Московский государственный
технический университет ГА, 2019

1. Цели и задачи курсовой работы

Курсовая работа по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника» на тему «Информационная защищенность волоконно-оптических линий связи» выполняется студентами IV курса специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и ставит следующие цели:

- систематизация и расширение теоретических и практических знаний по курсу дисциплины;
- овладение методикой исследования и навыками самостоятельной работы при решении инженерной задачи.

Задачей данной работы является исследование бюджета мощности волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), работающей по одномодовому ступенчатому оптическому волокну (ОВ) на одной оптической несущей, на регенерационном участке (РУ) без линейных оптических усилителей (ОУ) и компенсаторов дисперсии. В процессе выполнения задания необходимо определить длину регенерационного участка (РУ) для заданных параметров волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), рассчитать зависимость бюджета мощности от скорости передачи информации в линии и определить максимально допустимую скорость передачи для данного РУ [1].

В работе необходимо раскрыть следующие теоретические вопросы:

- 1) рассмотреть обобщенную структурную схему волоконно-оптической системы передачи [8];
- 2) проанализировать особенности оптических систем связи [6]:
 - основы линейного кодирования;
 - методы модуляции оптической несущей;
 - факторы шумов и искажений волоконно-оптической линии передачи;
- 3) рассказать о физических принципах формирования каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи, и доказать их уязвимость;
- 4) рассмотреть и проанализировать методы защиты информации, передаваемой по ВОЛС:
 - квантовая криптография;
 - криптографические методы защиты.

2. Структура и содержание пояснительной записки

Структура пояснительной записки включает в себя следующие основные элементы в порядке их расположения:

- титульный лист;
- задание на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- главы основной части (с выделением параграфов внутри глав);
- заключение;
- список литературы (использованных информационных источников);

– приложения.

Ориентировочный объем пояснительной записки 30-50 листов (без учета приложений).

Содержание должно отражать все структурные элементы курсовой работы: введение, наименование всех имеющихся в работе разделов, подразделов, глав, параграфов, заключение, список использованных источников и наименование приложений с указанием номеров страниц.

Основная часть курсовой работы представлена главами, логически раскрывающими основные этапы исследования.

Каждая глава и параграф должны иметь сформулированное название, отражающее сущность содержания. Главы должны быть самостоятельными структурными частями курсовой работы, каждая из которых содержит вступление, основное содержание и выводы.

Главы и параграфы должны быть логически связаны друг с другом.

Недопустимо использовать в тексте курсовой работы материал, заимствованный полностью или частично из любых других источников без соответствующей ссылки.

В случае обнаружения намеренного плагиата в тексте данная курсовая работа не допускается до публичной защиты и оценивается неудовлетворительно.

В заключении приводятся обобщенные итоги теоретической и практической разработки темы, отражается результат решения поставленных во введении задач, формулируются выводы, предложения и рекомендации по использованию результатов работы.

Список литературы (использованных информационных источников) приводится в обязательном порядке.

В приложение(я) выносятся те вспомогательные или дополнительные материалы, которые целесообразно по техническим или другим причинам не включать в основной текст.

3. Оформление курсовой работы

Расчетно-пояснительная записка курсовой работы должна быть представлена на бумажном и электронном носителе. Оформление текстовой части выполняется на компьютере. С целью обеспечения совместимости с установленным программным обеспечением следует представлять готовые работы в формате MS Word (версия не ниже 6.0), таблицы на отдельных листах могут быть выполнены в формате MS Excel (версия не ниже 5.0).

Печать на одной стороне листа белой бумаги размером 210x297 мм (формат A4).

Поля: левое 30 мм, правое не менее 10 мм, верхнее 20 мм, нижнее 20 мм. Тип шрифта для текста – Times New Roman, прямой. Высота шрифта – 14. Интервал – 1,5. Абзац (1,25) должен быть одинаковым по всей работе.

Отдельные таблицы, иллюстрации, распечатки могут быть выполнены на формате А3.

Выравнивание: для абзаца – двустороннее, для заголовка – по центру. Перенос слов в абзацах – по словам (слова в заголовках не разрываются, а переносятся целиком).

Ошибки (опечатки), графические неточности не допускаются. Все слова в тексте нужно писать полностью. Названия глав, параграфов, пунктов, подпунктов следует начинать с абзаца, их можно писать более крупным кеглем, чем текст. Допускается выделение полужирным шрифтом.

Все страницы работы должны быть пронумерованы последовательно арабскими цифрами. Номер должен располагаться в середине страницы в 1-2 мм от ее верхнего края. Нумерация страниц должна быть сквозной от титульного листа до последнего листа текста, включая иллюстративный материал (таблицы, графики, диаграммы и т.п.), расположенный внутри текста или после него, а также приложения. На титульном листе, который является первой страницей, а также задании на курсовую работу и странице, содержащей оглавление, номера страниц не ставятся, но учитываются при общей нумерации. Нумерация страниц должна соответствовать оглавлению (содержанию).

Расшифровка сокращения должна предшествовать самому сокращению.

Сокращение, встречающееся в тексте в первый раз, указывается в скобках, сразу за его расшифровкой. Например: ... Авиакомпания (АК) Далее по тексту сокращение употребляется уже без скобок. Используемые сокращения или аббревиатуры рекомендуется выделить в «Список сокращений», размещаемый после Заключения.

При написании в тексте формул значения символов и числовых коэффициентов должны быть приведены непосредственно под формулой, с новой строки в той же последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки начинается словом «где» без двоеточия после него. Если в тексте есть ссылки на формулы, то формулам необходимо присвоить порядковые номера, которые проставляются на уровне формулы арабскими цифрами в круглых скобках. Причем первый знак означает номер главы, а последующие – номер формулы в пределах главы. Например: «...в формуле (1.3)».

При написании формул, не помещающихся по ширине печатного листа, их разделяют на несколько строк, перенос допускается только на знаках равенства, сложения, вычитания, деления и умножения. При переносе вышеуказанные знаки повторяются в начале и в конце строк.

При приведении цифрового материала должны использоваться только арабские цифры, за исключением общепринятой нумерации кварталов, полугодий и т.д., которые обозначаются римскими цифрами. Количественные

числительные, римские цифры, а также даты, обозначаемые арабскими цифрами, не должны сопровождаться падежными окончаниями.

Математические знаки, такие как «+», «-», «<», «>», «=» и т.д., используются только в формулах. В тексте следует писать словами: плюс, минус и т.д. Знаки «№», «§», «%» применяются только вместе с цифрами. В тексте употребляются слова: «номер», «параграф», «процент».

Если в тексте необходимо привести ряд величин одной и той же размерности, то единица измерения указывается только после последнего числа.

4. Правила оформления иллюстративного материала

Необходимым условием оформления курсовой работы является иллюстративный материал, который может быть представлен в виде рисунков, схем, таблиц, графиков, диаграмм. Иллюстрации должны наглядно дополнять и подтверждать содержание текстового материала и отражать тему работы. На каждую единицу иллюстративного материала должна быть хотя бы одна ссылка в тексте курсовой работы.

В том случае, когда текст иллюстрируется таблицами, они оформляются следующим образом. Таблицы следует размещать сразу после ссылки на них в тексте. Таблицы последовательно нумеруются арабскими цифрами в пределах всей работы или главы. Над правым верхним углом таблицы помещают надпись «Таблица 1.1». Ниже посередине страницы должен быть помещен тематический заголовок.

Строки таблицы нумеруются только при переносе таблицы на другую страницу. Так же при переносе таблицы следует переносить ее шапку на каждую страницу. Тематический заголовок таблицы переносить не следует, однако над ее правым верхним углом необходимо указывать номер таблицы после слова «Продолжение». Например: «Продолжение таблицы 1».

Столбцы таблицы нумеруются в том случае, если она не умещается по ширине на странице. Если таблица располагается на странице не вертикально, а горизонтально, то шапка таблицы должна располагаться с левого края страницы.

Все иллюстрации, не относящиеся к таблицам (схемы, графики, диаграммы и т.д.), именуются рисунками. Им присваивается последовательная нумерация либо сквозная для всего текста, либо в пределах главы. Все рисунки должны иметь полные наименования. Номер и наименование рисунка записываются в строчку под его изображением посередине страницы. Например: «Рис. 3.1 Динамика объема перевозок авиакомпании».

При переносе рисунка на следующую страницу его наименование указывать не следует, однако под рисунком необходимо указывать его номер после слова «Продолжение». Например: «Продолжение Рис. 3.1».

Следует обратить внимание, что слова «Таблица» и «Рисунок» начинаются с большой буквы. Ссылки на иллюстративный материал в тексте курсовой работы могут начинаться с маленькой буквы. Номера таблиц и рисунков указываются без каких-либо дополнительных символов. Например: примерный план выполнения и защиты курсовой работы представлен в таблице 1.1.

5. Правила составления списка литературы

Использованные в процессе работы специальные литературные источники указываются в конце работы перед приложением. Список использованной литературы входит в основной объем работы. На каждый литературный источник в тексте работы обязательно должна быть хотя бы одна ссылка.

Список литературы может быть составлен либо в порядке упоминания литературных источников в дипломной работе, либо в алфавитном порядке. Второй способ удобнее, т.к. в этом случае легче указывать ссылки на литературу в тексте работы. Список адресов серверов Internet указывается после литературных источников. При указании веб-адреса рекомендуется давать заголовок данного ресурса (заголовок веб-страницы).

При составлении списка литературы в алфавитном порядке следует придерживаться следующих правил:

- законодательные акты и постановления правительства РФ;
- специальная научная литература;
- методические, справочные и нормативные материалы, статьи периодической печати;
- серверы Internet.

Для многотиражной литературы при составлении списка указываются: полное название источника, фамилия и инициалы автора, издательство и год выпуска (для статьи – название издания и его номер). Полное название литературного источника приводится в начале книги на 2-3 странице.

Для законодательных актов необходимо указывать их полное название, принявший орган и дату принятия. При указании адресов серверов Internet сначала указывается название организации, которой принадлежит сервер, а затем его полный адрес.

6. Защита курсовой работы

Студент должен представить на кафедру компакт-диск с пояснительной запиской.

Защита является завершающим этапом курсовой работы и проводится комиссией на кафедре.

Студент должен подготовить доклад на 5-8 минут, в котором нужно четко и кратко изложить основные положения работы с использованием

демонстрационного материала. Структура и содержание выступления определяется студентом и обязательно согласовывается с руководителем курсовой работы.

Иллюстративный материал необходим, в основном, для обеспечения процедуры защиты работы и выполняется, как правило, с использованием презентаций.

В докладе освещаются такие вопросы, как актуальность темы, цели и задачи работы, а также раскрываются ее содержание, результаты и выводы, вытекающие из проведенного исследования. Особое внимание необходимо уделить изложению того, что сделано самим студентом в ходе выполнения курсовой работы.

По окончании доклада студенту члены комиссии задают вопросы.

При оценке курсовой работы принимается во внимание уровень теоретической и практической подготовки студента, степень раскрытия темы в работе (глубина и проработанность каждого раздела), качество выполнения и оформления работы, качество и содержание доклада, ответы на вопросы. Курсовая работа оценивается по четырех балльной системе.

При неудовлетворительной оценке комиссия устанавливает, может ли студент представить работу к повторной защите с доработкой отдельных вопросов.

7. Содержание курсовой работы

7.1. Исходные данные

Исходными данными для решения поставленной задачи являются тип ОВ и параметры волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), к которым относятся скорость передачи линейной кодовой последовательности, уровень мощности оптического излучения лазера, центральная длина волны и ширина линии излучения лазера, уровень чувствительности приемника, полоса пропускания приемника (таблица 1).

Исходные данные к индивидуальному заданию определяются следующим образом.

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

Уровень мощности оптического излучения лазера определяется как,

$$p_0 = \frac{6 \cdot m}{10} - 1, \text{ дБм}, \quad (1)$$

где m – предпоследняя цифра номера зачетной книжки.

Уровень чувствительности приемника определяется как

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

где n – последняя цифра номера зачетной книжки.

Таблица 1

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение
Скорость передачи в линии	B , Мбит/с	155
Уровень мощности оптического излучения лазера	P_0 , дБм	
Уровень чувствительности приемника	P_R , дБм	
Центральная длина волны	λ_C , нм	
Ширина линии излучения лазера	$\Delta\lambda$, нм	
Марка ОВ		

Для определения центральной длины волны следует воспользоваться следующей формулой:

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

где mn – число, составленное из двух последних цифр номера зачетной книжки.

При этом ширина линии излучения лазера определяется следующим образом:

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

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

где Sum – сумма всех цифр номера зачетной книжки.

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

Результаты выбора исходных данных занесите в таблицу 1.

7.2. Расчет параметров передачи оптических волокон

Тип одномодового ступенчатого оптического волокна необходимо выбирать самостоятельно на основе анализа исходных данных и технических характеристик оптических волокон, представленных в Приложении 1 данного пособия [5]. На основании указанных технических характеристик определяются исходные данные для расчета параметров ступенчатого оптического волокна. Исходные данные занесите в таблицу 2.

Расчет коэффициента затухания оптического волокна

Расчет коэффициента затухания выполняется на центральной длине волны оптического канала [6]. Предварительно определите спектральный диапазон, в котором лежит центральная длина волны. Результирующий коэффициент затухания волокна в дБм/км определяется как сумма

$$\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{PP} + \alpha_{ИКП} + \alpha_{ОН}. \quad (5)$$

Таблица 2

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Марка ОВ		
Опорная длина волны спектрального диапазона О	λ_{SO} , нм	
Максимальное затухание на опорной длине волны спектрального диапазона О	α_{SO} , дБ/км	
Опорная длина волны спектрального диапазона Е (длина волны «водяного» пика)	λ_{SE} , нм	
Максимальное затухание на длине волны «водяного» пика (опорной длине волны диапазона Е)	α_{SE} , дБ/км	
Опорная длина волны спектрального диапазона С	λ_{SC} , нм	
Максимальное затухание на опорной длине волны спектрального диапазона С	α_{SC} , дБ/км	
Максимальный прирост затухания относительно опорной длины волны в рабочем диапазоне	$\Delta\alpha_i$, дБ/км	
Длина волны нулевой дисперсии	λ_0 , нм	
Параметр наклона спектральной характеристики дисперсии оптического волокна в точке нулевой дисперсии	S_0 , пс/нм ² ·км	
Максимальное значение поляризационной модовой дисперсии	PMD , пс/км ^{1/2}	

Здесь, составляющая потерь релеевского рассеяния на длине волны λ определяется соотношениями

$$\alpha_{PP} = (1 + \delta\alpha_{PP}) \cdot \bar{\alpha}_{PP}, \quad (6)$$

$$\bar{\alpha}_{PP} = 6.3 \cdot 10^{11} / \lambda^4. \quad (7)$$

Составляющая потерь инфракрасного поглощения на длине волны λ определяется по формулам

$$\alpha_{ИКП} = (1 + \delta\alpha_{ИКП}) \cdot \bar{\alpha}_{ИКП}, \quad (8)$$

$$\bar{\alpha}_{ИКП} = 7.81 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-4.85 \cdot 10^4 / \lambda\right). \quad (9)$$

Составляющая потерь, обусловленная примесями ОН⁺, рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{OH} = \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, & \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH, \max} \\ \alpha_{OH, \max}, & \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH, \max} \end{cases}, \quad (10)$$

где

$$\alpha_{OH, \max} = \alpha_{SE} - \alpha_{PP}(\lambda_{SE}) - \alpha_{ИКП}(\lambda_{SE}), \quad (11)$$

$$\bar{\alpha}_{OH} = \frac{7 \cdot \Delta\alpha_{OH}}{49 + (\lambda - \lambda_{SE})^2}. \quad (12)$$

В формулах (6)-(12) длина волны подставляется в нм. Размерность искомых коэффициентов затухания – дБм/км. Параметры $\Delta\alpha_{OH}$, $\delta\alpha_{PP}$, $\delta\alpha_{ИКП}$ уточняются для каждого конкретного типа оптического волокна в зависимости от его технических данных – значений максимальных потерь на опорных длинах волн в диапазонах О, С и на длине волны «водяного пика» диапазона Е. Расчеты выполняются в следующем порядке.

$$\Delta\alpha_{OH} = \alpha_{SE} - \bar{\alpha}_{PP}(\lambda_{SE}), \quad (13)$$

$$\delta\alpha_{PP} = \frac{\alpha_{SO} - \alpha_{OH}(\lambda_{SO})}{\bar{\alpha}_{PP}} - 1, \quad (14)$$

$$\delta\alpha_{ИКП} = \frac{\alpha_{SC} - \alpha_{OH}(\lambda_{SC}) - \alpha_{PP}(\lambda_{SC})}{\bar{\alpha}_{ИКП}} - 1, \quad (15)$$

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

Во всем спектральном диапазоне должно выполняться неравенство

$$\alpha_{\max} < \alpha_{SX} - \Delta\alpha_{\lambda}, \quad (16)$$

где α_{SX} – коэффициент затухания оптического волокна на опорной длине волны, ближайшей к спектральному диапазону, в котором лежит центральная длина волны оптического канала, равный, соответственно, α_{SO} , α_{SE} или α_{SC} . Если условие (16) не выполняется, следует полагать

$$\alpha_{\max} = \alpha_{SX} - \Delta\alpha_{\lambda}.$$

Среднее значение коэффициента затухания оптического волокна можно приближенно оценить следующим образом

$$\bar{\alpha} = \alpha_{\max} - 0.016. \quad (17)$$

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

$$D_{OB}(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda_C - \frac{\lambda_0^4}{\lambda_C^3} \right), \quad (18)$$

где λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм; λ_c – центральная длина волны, нм; S_0 – параметр наклона спектральной характеристики дисперсии оптического волокна в точке нулевой дисперсии, пс/(нм²·км).

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

Результаты расчетов параметров на центральной длине волны сведите в таблицу 3.

Таблица 3

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Максимальное значение затухания ОВ на центральной длине волны	$\alpha_{\max}$, дБ/км	
Среднее значение затухания ОВ на центральной длине волны	$\bar{\alpha}$, дБ/км	
Параметр хроматическая дисперсия ОВ на центральной длине волны	D_{OV} , пс/нм км	

7.3. Определение энергетического потенциала системы

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

$$W = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}}, \quad (19)$$

где W – энергетический потенциал (перекрываемое затухание), дБм; $p_{\text{пер}}$ – уровень мощности оптического излучения передатчика ВОСП, дБм; $p_{\text{пр}}$ – уровень чувствительности приемника, дБм.

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

Приемник ВОСП характеризуется как уровнем чувствительности, так и уровнем перегрузки – максимальным значением уровня мощности оптического

излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала [7]. Разность между уровнем перегрузки и уровнем чувствительности приемника ВОСП определяет пределы регулировки АРУ системы – ΔA . Типичное значение $\Delta A=20$ дБм. Результат расчета энергетического потенциала и предполагаемое значение пределов регулировки АРУ внесите в таблице 4.

Таблица 4

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Энергетический потенциал	W, дБм	
Пределы регулировки АРУ	ΔA , дБм	

7.4. Оптические кроссы и параметры разъемных соединений

Соединение линейного и станционного ОВ на оптическом кроссе выполняется с помощью оптических разъемов, которые состоят из вилок (коннекторов) и розеток (адаптеров). Штекерные наконечники коннекторов с двух сторон вставляют в розетку разъема, что и обеспечивает соединение волокон. Аналогично производится подключение волокон к активному оборудованию ВОСП, интерфейс которого включает ответную часть розетки оптического разъема. Оптическими коннекторами оконцовываются (армируются) оптические шнуры – оптические волокна со вторичными внешними защитными покрытиями. Шнуры, оконцованные с одной стороны, принято называть пигтейлами. Шнуры, оконцованные с двух сторон, называют патчкордами [3, 4].

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

Поскольку соединители должны вносить минимальные искажения в оптический тракт, то, в первую очередь, стараются минимизировать вносимые ими потери и неоднородности. Соответственно, к параметрам передачи оптических разъемов относят вносимые потери (затухание) и затухание отражения. Потери на разъемном соединении $A_{I,PC}$ определяются как разность уровней средней мощности оптического излучения на входе и выходе оптического разъема. Затухание отражения – это разность уровней мощности

оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на передаче и мощности оптического излучения, возвращающегося к этой точке, выраженная в дБм. Различают оптические разъемы типа FC/PC, SC/PC и FC/APC, SC/APC. Обозначение PC (physical contact) означает физический контакт торцов соединяемых волокон. Обозначение APC (angle physical contact) также подразумевает физический контакт торцов соединяемых волокон, но при этом скол (шлифовка торцов оптических волокон выполнена под углом 88-89 градусов. Такой угол обеспечивает при незначительном увеличении потерь в соединении значительное уменьшение неоднородности (увеличение затухания отражения).

Таблица 5

Наименование параметра	Усл. обозн.	Тип	Значение
Максимальное значение потерь в разъемном соединении	$A_{1,PC}$, дБ	FC/PC, SC/PC	0.4
		FC/APC, SC/APC	0.5
Минимальное значение коэффициента отражений	A_{OTP} , дБ	FC/PC, SC/PC	40
		FC/APC, SC/APC	58
Максимальное число соединений		FC SC	1000

К эксплуатационным характеристикам оптических разъемов относятся диапазоны температуры, давления, влажности, в которых обеспечивается нормальная работа разъемных оптических соединений, а также допустимое число соединений. Типичные характеристики оптических разъемов приведены в таблице 5.

7.5. Нормы приемо-сдаточных измерений ЭКУ

Потери на ЭКУ ВОЛП нормируются таким образом, чтобы разность между энергетическим потенциалом ВОСП и суммарными потерями оптической мощности на ЭКУ совместно со станционными кабелями, которые включают и дополнительные потери, обусловленные влиянием отражений, дисперсии (хроматической и поляризационной модовой), модовых шумов и чирп-эффекта, была не менее допустимого эксплуатационного запаса. Эксплуатационный запас на ЭКУ определяется как сумма эксплуатационного запаса на аппаратуру и эксплуатационного запаса на кабель. Нормы на эксплуатационный запас приведены в таблице 6 [2].

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

$$\Delta a = \delta a \cdot A_{ЭКУ} / 100. \quad (20)$$

Здесь $A_{ЭКУ}$ – суммарные измеряемые потери оптического линейного тракта на ЭКУ. Поскольку для нормальной работы ВОЛП необходимо, чтобы

выполнялось условие $A_{ЭКУ} < W$, в качестве оценки максимальной погрешности можно принять значение

$$\Delta a = \delta a \cdot W / 100. \quad (21)$$

Рассчитайте его.

Таблица 6

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Эксплуатационный запас аппаратуры	$A_{ЭЗА}$, дБ	3
Эксплуатационный запас кабеля	$A_{ЭЗК}$, дБм	3
Максимальная погрешность измерения затухания на ЭКУ	δa , %	5

Распределение потерь в неразъемных соединениях ЭКУ, определяемое для каждого оптического волокна по отдельности, должно соответствовать требованиям, представленным в таблице 7.

Таблица 7

Длина волны	Максимально допустимые потери в неразъемных соединениях для	
	100% соединений $A_{НС\max}$, дБ	50% соединений $\bar{A}_{НС}$, дБ
1300 нм	0.2	0.1
1550 нм	0.1	0.05

7.6. Расчет длины элементарного кабельного участка ВОЛП

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

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

$$L_{ном} = \frac{W - A_{ЭЗА} - A_{РС} - A_{Д} + A_{НС\max} - A_{ЭЗК} - \Delta a}{\alpha_{\max} + \frac{A_{НС\max}}{l}}, \quad (22)$$

$$L_{мин} = \frac{W - \Delta a - A_{РС} + A_{НС}}{\bar{\alpha} + \frac{\bar{A}_{НС}}{l}}, \quad (23)$$

$$L_{\max} = \frac{W - A_{\text{ЭЗЛ}} - A_{\text{РС}} - A_{\text{Д}} - \bar{B} \cdot \sqrt{L_{\text{ном}}} + \bar{A}_{\text{НС}} - A_{\text{ЭЗК}} - \Delta a}{\bar{\alpha} + \frac{\bar{A}_{\text{НС}}}{\bar{l}}}, \quad (24)$$

где W – энергетический потенциал системы передачи, дБ; $A_{\text{ЭЗЛ}}$ – эксплуатационный запас аппаратуры, дБ; $A_{\text{ЭЗК}}$ – эксплуатационный запас кабеля, дБ; $A_{\text{РС}}$ – потери в разъёмных соединениях, дБ; $A_{\text{НСмакс}}$ – максимальное значение потерь неразъёмного соединения, дБ; $\bar{A}_{\text{НС}}$ – среднее значение потерь неразъёмного соединения, дБ; $A_{\text{Д}}$ – эксплуатационный запас энергетического потенциала на дисперсию, учитываемый на регенерационных участках предельной длины с оптическими усилителями, дБ; ΔA – пределы регулировки АРУ, дБ; $\alpha_{\text{макс}}$ – максимальное значение коэффициента затухания ОВ, дБ/км; $\bar{\alpha}$ – среднее значение коэффициента затухания ОВ, дБ/км; $\bar{l}$ – средняя строительная длина ОК, км; Δa – погрешность измерения затухания, дБ.

Параметр $\bar{B}$ определяется по формуле

$$\bar{B} = \frac{3 \cdot 0.8}{2 \cdot \lambda^4 \cdot \sqrt{12}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\bar{l}}}, \quad (25)$$

где λ – рабочая длина волны, мкм.

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

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

Результаты расчетов максимальной, минимальной и номинальной длин ЭКУ занесите в таблицу 8.

Таблица 8

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Параметр ЭКУ	$\bar{B}$	
Номинальная длина ЭКУ	$L_{\text{ном}}$, км	
Минимальная длина ЭКУ	$L_{\text{мин}}$, км	
Максимальная длина ЭКУ	$L_{\text{макс}}$, км	

7.7. Расчет дисперсионных характеристик ОВ на ЭКУ

Длина регенерационного участка ВОЛП ограничивается не только затуханием, но и дисперсией линии передачи. Допустимые значения хроматической и поляризационной модовой дисперсии на регенерационном участке ВОЛП зависят от скорости передачи линейной кодовой последовательности. В случае применения кода NRZ и модуляции в соответствии с рекомендациями МСЭ и Т максимально допустимые для РУ значения хроматической дисперсии $D_{\text{РУ}}$ в пс/нм и поляризационной модовой

дисперсии PMD_{PY} в пс при ухудшении отношения сигнал/помеха не более, чем на 1,0 дБ, определяются по формулам

$$D_{PY} = \frac{104000}{B^2}, \quad (26)$$

$$PMD_{PY} = \frac{140}{B}, \quad (27)$$

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

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

$$D_{ch} = D_{OB} \cdot \Delta\lambda, \quad (28)$$

где D_{OB} – значение параметра дисперсии оптического волокна, определяемое по его техническим данным, пс/(нм·км);

$\Delta\lambda$ – ширина линии излучения лазера, нм.

Таблица 9

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Хроматическая дисперсия оптического волокна	D_{OB} , пс/нм км	
Приведенное значение хроматическая дисперсия оптической линии передачи	D_{ch} , пс/км	
Прогнозируемое номинальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{НОМ}$, пс	
Прогнозируемое минимальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{МИН}$, пс	
Прогнозируемое максимальное значение хроматической дисперсии ЭКУ	$D_{МАКС}$, пс	
Максимальное допустимое значение хроматической дисперсии ВОЛП на ЭКУ	$D_{ЭКУ}$, пс	
Прогнозируемое номинальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{НОМ}$, пс	
Прогнозируемое минимальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{МИН}$, пс	
Прогнозируемое максимальное значение ПМД ЭКУ	$PMD_{МАКС}$, пс	
Максимальное допустимое значение ПМД ЭКУ	$PMD_{ЭКУ}$, пс	

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

$$D_{НОМ} = D_{ch} \cdot L_{НОМ}, \quad (29)$$

$$D_{МИН} = D_{ch} \cdot L_{МИН}, \quad (30)$$

$$D_{\text{МАКС}} = D_{\text{ch}} \cdot L_{\text{макс}}. \quad (31)$$

А прогнозируемые значения поляризационной модовой дисперсии рассчитываются по формулам:

$$PMD_{\text{НОМ}} = PMD \cdot \sqrt{L_{\text{ном}}}, \quad (32)$$

$$PMD_{\text{МИН}} = PMD \cdot \sqrt{L_{\text{мин}}}, \quad (33)$$

$$PMD_{\text{МАКС}} = PMD \cdot \sqrt{L_{\text{макс}}}. \quad (34)$$

Результаты расчета параметров дисперсии по описанной выше методике свести в таблицу 9.

В формулах (22-24) накладываемые дисперсией ограничения на длину регенерационного участка учитываются с помощью параметра A_d . Значение эксплуатационного запаса на дисперсию равно дополнительным потерям (приращению уровня помех) из-за шумов межсимвольной интерференции (ISI), которые включают в себя перекрестные помехи и шумы синхронизации. То есть $A_d = a_{\text{ISI}}$. Эти дополнительные потери равны

$$a_{\text{ISI}} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{1 - 1.425 \cdot \exp \left[-1.28 \cdot \left(\frac{T_0}{T_L} \right) \right]} \right\}, \quad (35)$$

где T_0 - время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника излучения от 10% до 90% его максимального значения, с; T_L - время нарастания фронта оптического импульса на выходе оптического приемника от 10% до 90% его максимального значения, с.

Время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника излучения определяется как

$$T_0 = \frac{0.48}{B}. \quad (36)$$

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

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0.35}{BW_R} \right)^2 + \sigma_{\text{ЭКУ}}^2}. \quad (37)$$

Здесь BW_R – полоса пропускания фотоприемника, Гц; $\sigma_{\text{ЭКУ}}$ – среднеквадратическое значение дисперсии на ЭКУ, с.

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

Прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на номинальной длине ЭКУ рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{ЭКУ}} = \sqrt{D_{\text{НОМ}}^2 + PMD_{\text{НОМ}}^2}. \quad (38)$$

Результаты расчета эксплуатационного запаса на дисперсию для номинальной длины ЭКУ проектируемой ВОЛП сведите в таблицу 10.

Таблица 10

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

7.8. Расчет бюджета мощности

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

$$A_{ЭЗ} = W - A_{ЭКУ} - \sum a_{Шл}, \quad (39)$$

где $A_{ЭКУ}$ – затухание ЭКУ совместно со станционными кабелями (патчкордами); $\sum a_{Шл}$ – суммарное значение дополнительных потерь, дБ.

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

$$A_{ЭЗдоп} = A_{ЭЗА} + A_{ЭЗА}. \quad (40)$$

То есть, выполнялось условие $A_{ЭЗ} > A_{ЭЗдоп}$. Это условие баланса бюджета мощности на ЭКУ. Максимальное значение затухания ЭКУ совместно со станционными кабелями (патчкордами) рассчитывается следующим образом:

$$A_{ЭКУ} = \alpha_{макс} \cdot L_{НОМ} + N_{НС} \cdot A_{НСмакс} + A_{РС}, \quad (41)$$

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

Количество неразъемных соединений на ЭКУ равно

$$N_{НС} = \frac{L_{МАКС}}{l} + 1. \quad (42)$$

Суммарное значение дополнительных потерь складывается из дополнительных потерь за счет собственных шумов лазера, за счет за счет

шумов из-за излучения оптической мощности при передаче «нуля», за счет шумов межсимвольной интерференции и, соответственно, равно

$$\sum a_{Ili} = a_{RIN} + a_{\varepsilon} + a_{ISI}. \quad (43)$$

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

$$a_{RIN} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (Q \cdot \sigma_{RIN})^2}} \right), \quad (44)$$

$$\sigma_{RIN}^2 = 4 \cdot BW_R \cdot 10^{\frac{RIN}{10}}. \quad (45)$$

Значение параметра собственных шумов источника – RIN обычно лежит в пределах $-120 < RIN < -140$ дБм. Параметр Q определяется в зависимости от заданного максимально допустимого коэффициента ошибок BER из уравнения

$$BER = \frac{1}{Q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left(\frac{-Q^2}{2} \right). \quad (46)$$

Результаты решения уравнения (46) приведены в таблице 11.

Таблица 11

BER	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
Q	5.99	6.63	6.71	7.04

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

$$a = 10 \lg \left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right), \quad (47)$$

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

Параметр ε связан с коэффициентом гашения, равным отношению мощности оптического излучения при передаче логической единицы цифрового сигнала к мощности оптического излучения при передаче логического нуля, выраженным в дБм. Расчет дополнительных потерь за счет шумов межсимвольной интерференции был рассмотрен ранее. Результаты расчета бюджета мощности ЭКУ ВОЛП занесите в таблицу 12. Сделайте выводы по результатам расчетов.

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

требования (замена оптического волокна, установка оптических усилителей, компенсаторов дисперсии или регенераторов, замена оборудования).

Таблица 12

Наименование параметра	Усл. обозн.	Значение
Энергетический потенциал	W , дБ	
Затухание ЭКУ совместно со стационарными кабелями	$A_{ЭКУ}$, дБ	
Дополнительные потери из-за шумов межсимвольной интерференции	a_{ISI} , дБ	
Среднеквадратическое значение дисперсии на участке	$\sigma_{ЭКУ}$, пс	
Параметр качества	Q	
Отношение оптических мощностей при передаче «нуля» и «единицы»	ε	
Дополнительные потери за счет шумов из-за излучения оптической мощности при передаче «нуля»	a_{ε} , дБ	
Параметр собственных шумов лазера	RIN	
Полоса пропускания фотоприемника	BW_R , МГц	
Параметр собственных шумов лазера	σ_{RIN}	
Дополнительные потери из-за собственных шумов лазера	a_{RIN} , дБ	
Суммарное значение дополнительных потерь	$\sum a_{IIIi}$, дБ	
Чистый бюджет мощности	A_{Σ} , дБ	
Требуемый эксплуатационный запас	$A_{\Sigma доп}$, дБ	

7.9. Определение максимально допустимой скорости передачи на ЭКУ

Воспользовавшись описанной выше методикой, рассчитайте дополнительные потери и чистый бюджет мощности (прогнозируемый эксплуатационный запас) для номинальной длины ЭКУ в зависимости от скорости передачи линейной кодовой последовательности, увеличивая скорость передачи с кратностью равной четырем.

Таблица 13

[illegible]

По результатам расчетов заполните таблицу 13. Постройте графики зависимостей $a_{ISI}(B)$, $a_{RIN}(B)$, $A_{ЭЗ}(B)$. На графике зависимости $A_{ЭЗ}(B)$ проведите прямую, соответствующую нормируемому значению эксплуатационного запаса на ЭКУ.

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

7.10. Расчет диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени

Диаграмма распределения амплитуды сигнала по времени представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), отображаемый на экране осциллографа.

Предварительно вычислите уровень мощности источника оптического излучения лазера, дБ:

$$P_0 = 10 \lg \left(\frac{P_0}{10^{-3}} \right), \quad (48)$$

где P_0 – уровень мощности на выходе источника оптического излучения.

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

$$P_L = P_0 - A_{ЭКУ} - \sum a_{и}, \text{ дБ}. \quad (49)$$

Приведенная ко входу фотоприемника ОСП мощность оптического сигнала, мВт:

$$P_L = 10^{0.1 P_L}. \quad (50)$$

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

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{ном}) + 2, \text{ дБ}. \quad (51)$$

где $OSNR$ – оптическое отношение сигнал/шум (Optical Signal-to-Noise Ratio); $Q_{ном}$ – номинальное значение Q -фактора, соответствующего нормированному коэффициенту ошибок $BER_{ном}$ (см. таблицу 11).

Согласно определению, уровень чувствительности фотоприемника ОСП – это минимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. С учетом вышесказанного максимальный уровень мощности шума фотоприемника P_{noise} можно оценить по следующей формуле:

$$P_{noise} = P_R - 20 \cdot \lg(Q_{ном}) - 2, \text{ дБ}, \quad (52)$$

где p_R – уровень чувствительности фотоприемника, дБ; p_{noise} – уровень шума фотоприемника, дБ.

Чувствительность фотоприемника и мощность шума в мВт рассчитывается как

$$\begin{aligned} P_R &= 10^{0.1 \cdot p_R}, \text{ мВт}; \\ P_{noise} &= 10^{0.1 \cdot p_{noise}}, \text{ мВт}. \end{aligned} \quad (53)$$

Построение глаз-диаграммы осуществляется путем наложения отклика системы в предположении гауссовой формы импульса на передачу «изолированного» логического «0» в последовательности логических «1» (комбинация 101)

$$P_{out}^{''0''}(t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\} \quad (54)$$

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

$$P_{out}^{''1''}(t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (55)$$

где s_L – среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП. Данная величина непосредственно связана с T_L следующим соотношением:

$$s_L = \frac{T_L}{2.563}, \text{ с}; \quad (56)$$

T – интервал передачи битовой последовательности:

$$T = N_{symb} \cdot \tau_{0.5}, \text{ с}, \quad (57)$$

где N_{symb} – количество символов битовой последовательности, в данном случае принять $N_{symb} = 3$; $\tau_{0.5}$ – длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения; обратно пропорциональна скорости передачи сигнала в линии:

$$\tau_{0.5} = \frac{1}{B_L}, \text{ с}. \quad (58)$$

Выполните построение глаз-диаграммы в диапазоне $(-2T; 2T)$. На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника P_L и чувствительность фотоприемника P_R – одного порядка). Пример построения диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени по результатам расчета представлен на рис. 1.

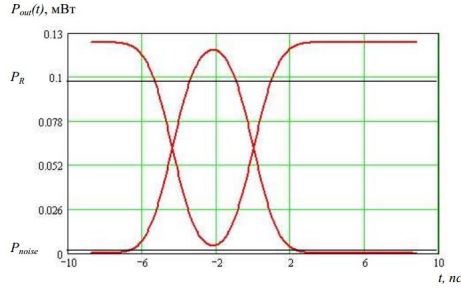


Рис. 1 Пример построения диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени

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

Известна методика оценки коэффициента ошибок *BER* на основе определения *Q*-фактора. *Q*-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП. Существует определенная функциональная зависимость *Q*-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок *BER*. *Q*-фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на энергетическом уровне, а именно – непосредственно по диаграмме распределения амплитуды сигнала по времени. При этом выполняется построение функции распределения состояний «1» и «0», а для этих распределений, в предположении их Гауссовой формы, оцениваются математические ожидания состояний $E1$ и $E0$ и их среднеквадратические отклонения σ_1 и σ_0 .

Предварительно, для оценки параметров распределений состояний «1» и «0», определите точку максимального раскрыва диаграммы (рис. 2):

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_{out}^2}\right)}} \right] \cdot \frac{s_L^2}{T}, \text{ с.} \quad (59)$$

Рассчитайте границы раскрыва диаграммы (зоны принятия решения), соответствующие минимальной зарегистрированной мощности при передаче логической «1» $P1_{min}$ и максимальной зарегистрированной мощности при передаче логического «0» $P0_{max}$:

$$P1_{\min} = P_{out}^{''1''}(\tau_{open}), \text{ мВт};$$

$$P0_{\max} = P_{out}^{''0''}(\tau_{open}), \text{ мВт.}$$
(60)

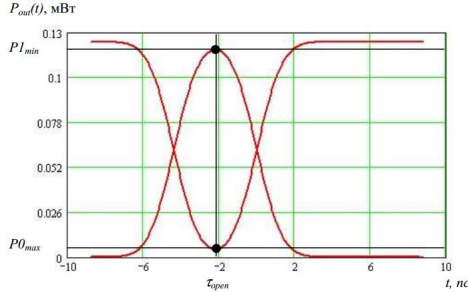


Рис. 2 Оценка параметров распределений логических состояний «1» и «0»

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

$$E1 = \begin{cases} P_L, & P_L \geq P_R \\ P_R, & P_L < P_R \end{cases}, \text{ мВт},$$
(61)

$$E0 = P_{noise}, \text{ мВт}$$
(62)

и среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0 , соответственно, воспользовавшись правилом «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3}, \text{ мВт},$$
(63)

$$\sigma_1 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3}, & E0 \leq P0_{\max} \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3}, & E0 > P0_{\max} \end{cases}, \text{ мВт.}$$
(64)

Q-фактор рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}.$$
(65)

При этом сам коэффициент ошибок BER определяется по следующей формуле:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right),$$
(66)

где erfc – вспомогательная функция интеграла ошибок:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta.$$
(67)

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

$$\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3. \quad (68)$$

Выполните построение глаз-диаграммы в диапазоне $(-2T; 2T)$ канала цифровой ОСП заданного стандарта. На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника P_L и чувствительность фотоприемника P_R – одного порядка). Пример построения диаграммы по результатам расчета представлен на рис. 1. Рассчитайте показатели качества канала исследуемой цифровой ОСП заданного стандарта. Результаты расчета занесите в табл. 14. Сравните рассчитанные по построенной диаграмме распределения амплитуды сигнала по времени коэффициенты ошибок BER с номинальным допустимым значением $BER_{ном}$, соответствующим заданному стандарту

Таблица 14

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Значения
1	τ_{open}	пс	
2	$P1_{min}$	мВт	
3	$P0_{max}$	мВт	
4	$E1$	мВт	
5	$E0$	мВт	
6	σ_1	мВт	
7	σ_0	мВт	
8	Q		
9	BER		

Список использованной литературы

1. ОСТ 45.190-2001 Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения. – М.: Издание официальное, ЦНТИ «ИНФОРМСВЯЗЬ», 2002.- 14с.
2. Нормы приемо-сдаточных измерений элементарных кабельных участков магистральных и внутризоновых подземных волоконно-оптических линий передачи сети общего пользования. Утверждены приказом Госкомсвязи России №97 от 17.12.97.
3. Рекомендация G957 МСЭ-Т Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи, относящихся к синхронной цифровой иерархии.
4. Рекомендация G651 МСЭ-Т Оптические стыки для одноканальных систем с оптическими усилителями.
5. Рекомендация G652 МСЭ-Т Характеристики одномодовых волоконно-оптических кабелей.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н. – Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005.
7. Сбитнев А.В. Квантовая и оптическая электроника. Часть I. Электромагнитные волны. Лазерные и квантовые усилители: Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013 – 80 с.
8. Сбитнев А.В., Матюхин К.Н. Волоконно-оптические направляющие системы: Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2016 – 80 с.

